



**Universitat**  
de les Illes Balears

## **TREBALL DE FI DE MÀSTER**

# **SIMULADOR GÀSTRIC HUMÀ: DISSENY D'UN DIGESTOR CENTRAT EN LA REPLICACIÓ DEL PERISTALTISME**

**MIQUEL FONT MAS**

**Màster Universitari en Enginyeria Industrial**

**Centre d'Estudis de Postgrau**

**Any Acadèmic 2020-21**



# **SIMULADOR GÀSTRIC HUMÀ: DISSENY D'UN DIGESTOR CENTRAT EN LA REPLICACIÓ DEL PERISTALTISME**

**Miquel Font Mas**

**Treball de Fi de Màster**

**Centre d'Estudis de Postgrau**

**Universitat de les Illes Balears**

**Any Acadèmic 2020-21**

Paraules clau del treball:

Digestor, prototip, control, robòtica, digestió gàstrica, simulació, química, electrònica,  
Teensy, actuador, sensor.

*Nom Tutor/Tutora del Treball Dr. Miguel Jesús Roca Adrover*

*Nom Tutor/Tutora (si escau) Dra. Susana Simal Florindo*





Universitat de les  
Illes Balears



# Treball Final de Master

MÀSTER EN ENGINYERIA INDUSTRIAL

## Simulador Gàstric Humà:

Disseny d'un digestor centrat en  
la replicació del peristaltisme

MIQUEL FONT MAS

[miquelfont@gmail.com](mailto:miquelfont@gmail.com)

### **Tutors**

Dr. Miquel Roca Adrover

Dra. Susana Simal Florindo

Escola Politècnica Superior  
Universitat de les Illes Balears  
Palma, 13 de juny de 2021



The authors acknowledge the financial support of the National Institute of Research and Agri-Food Technology (INIA), ERDF funds EU, and the Spanish research agency (AEI) (RTA2015-00060-C04-03 project).



**Unión Europea**

Fondo Europeo de Desarrollo Regional







*Si pogués fer-me escata  
i amagar-me a la platja  
per sentir sons i tardes del passat,  
d'aquest món d'enyorança,  
amor i calma, perfumat de lluna, foc i rom.*

*Si pogués enfilat-me a l'onada més alta  
i guarnir de palmeres el record,  
escampant amb (canyella) totes les cales  
i amb petxines fer-los un bressol.*

Vestida de nit  
Sílvia Pérez Cruz



## RESUM

Una de les principals preocupacions de l'Organització Mundial de la Salut és la malnutrició: afectant a gairebé una tercera part de la població de la Terra. És notable, que la majoria dels casos de malnutrició són a causa del sobrepès. Per combatre aquest enemic, tant consumidors com productors estan pressionant per estimular un canvi de paradigma, on l'alimentació sigui saludable.

Per poder estudiar la degradació dels aliments i l'absorció dels nutrients s'utilitzen simuladors gàstrics, que reproduïxen el procés de digestió en humans. El principal avantatge de l'experimentació *in vitro* és l'adquisició de dades durant tot el procés, mentre que en els experiments realitzats *in vivo* sols es pot obtenir la informació del resultat, no del procés. No obstant, la gran majoria d'equips no tenen en compte la component dinàmica de la digestió gàstrica.

Per això, el principal objectiu d'aquest projecte és el disseny d'un prototip que permeti realitzar el procés de digestió gàstrica de manera controlada i reiterada, amb especial atenció a la reproducció del moviment peristàltic present a l'estómac.

## RESUMEN

Una de las principales preocupaciones de la Organización Mundial de la Salud es la malnutrición: afectando cerca de un tercio de la población de la Tierra. Es notable, que la mayoría de los casos de malnutrición son causa del sobrepeso. Para combatir este enemigo, tanto consumidores como productores están presionando para estimular un cambio de paradigma, donde la alimentación sea saludable.

Para poder estudiar la degradación de los alimentos y la absorción de los nutrientes se utilizan simuladores gástricos, que reproducen el proceso de digestión en humanos. La principal ventaja de la experimentación *in vitro* es la adquisición de datos durante todo el proceso, mientras que en los experimentos *in vivo* solo se puede obtener la información del resultado, no del proceso. Sin embargo, la gran mayoría de máquinas no tienen en cuenta la componente dinámica de la digestión gástrica.

Por ese motivo, el principal objetivo de este proyecto es el diseño de un prototipo que permita realizar el proceso de digestión gástrica de manera controlada y reiterada, con especial atención a la reproducción del movimiento peristáltico presente en el estómago.

## ABSTRACT

One of the main concerns of the World Health Organization is malnutrition: affecting about a third of the Earth's population. It is remarkable, as most cases of malnutrition are caused by overweight. To combat this enemy, both consumers and producers are pressing to stimulate a paradigm shift, where food is healthy.

In order to study the degradation of food and the absorption of nutrients, gastric simulators are used, which reproduce the digestion process in humans. The main advantage of *in vitro* experimentation is the acquisition of data throughout the process, whereas in *in vivo* experiments data can only be obtained about the result, not the process. However, most machines do not consider the dynamic component of gastric digestion.

For this reason, the main objective of this project is the design of a prototype that allows the gastric digestion process to be carried out in a controlled and repeated manner, with special attention to the reproduction of the peristaltic movement present in the stomach.



# SUMARI

<b>Resum</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>vi</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Sumari</b>	<b>ix</b>
<b>Acrònims</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introducció</b>	<b>1</b>
1.1. Motivació	1
1.2. Objectiu i abast	2
1.3. Estructura	2
<b>2 El procés de digestió gàstrica</b>	<b>5</b>
2.1. Motilitat gàstrica	5
2.1.1. Estructura funcional de l'estómac	5
2.1.2. L'activitat motora gàstrica i els períodes digestius	6
2.1.3. Els períodes interdigestius i el dejú	10
2.2. Secreció gàstrica i activitat funcional de la mucosa gàstrica	12
<b>3 Estat de l'art</b>	<b>15</b>
3.1. Models estàtics monocompartamentals	15
3.2. Models dinàmics monocompartamentals	16
3.3. Models dinàmics multicompartamentals	18
3.4. Modelització del peristaltisme	19
3.4.1. Mescles no peristàltiques	19
3.4.2. Modelització matemàtica del peristaltisme	22
3.4.3. Bany aquós i peristaltisme per pulsacions (DGM - Wickham)	23
3.4.4. Mecanitzat per pressió i desplaçament (HGS - UC Davis)	28
3.4.5. Sistema pneumàtic amb control anul·lar (TIM1 - Universitat de Auckland)	29
<b>4 Modelització del sistema</b>	<b>37</b>
4.1. Introducció	37
4.1.1. Descripció del sistema	37
4.1.2. Requeriments i limitacions	37

4.2.	Propostes de disseny	38
4.2.1.	Sistemes pneumàtics	38
4.2.2.	Sistemes hidràulics	39
4.2.3.	Sistemes mecànics	39
4.2.4.	Conceptualització de la proposta	39
4.3.	Contenedor gàstric	40
4.4.	Peristaltisme	40
4.5.	Mecanisme secretor	41
4.6.	Regulació tèrmica	43
<b>5</b>	<b>Framework</b>	<b>45</b>
5.1.	Mecanització i estructura	45
5.1.1.	Bastidor i suports	45
5.1.2.	Contenedor gàstric	46
5.1.3.	Protecció elèctrica	47
5.2.	Sensors i actuadors	51
5.2.1.	Control de la temperatura	51
5.2.2.	Control de l'acidesa	53
5.2.3.	Reproducció del peristaltisme	56
5.2.4.	Sistema de recollida de mostres	60
5.3.	Sistema de control	61
5.3.1.	Dispositiu de control	62
5.3.2.	Logger: registre de dades	64
5.3.3.	Plaques i equips auxiliars	64
5.3.4.	Informació addicional	66
5.4.	Visió de conjunt del sistema	68
<b>6</b>	<b>Implementació</b>	<b>69</b>
6.1.	Introducció	69
6.2.	Acondicionament i calibració del sistema	69
6.3.	Digestió	70
6.3.1.	Control de temperatura	71
6.3.2.	Control de pH	71
6.3.3.	Control del peristaltisme	71
6.3.4.	Mostreig de líquid i sòlid	72
6.4.	Finalització	72
6.5.	Mode testeig	72
<b>7</b>	<b>Resum econòmic del projecte</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>Conclusions</b>	<b>79</b>
8.1.	Experiència	80
8.2.	Treball realitzat	81
8.3.	Recerca i desenvolupament futur	81
8.4.	Agraïments	82
<b>A</b>	<b>Plànols de les pinces</b>	<b>83</b>



<i>SUMARI</i>	XI
<b>B Plànols dels circuits electrònics</b>	<b>87</b>
<b>C Esquema del quadre elèctric</b>	<b>101</b>
<b>D Documentació contable</b>	<b>105</b>
<b>E Documentació UC Davis</b>	<b>123</b>
<b>Índex de figures</b>	<b>127</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>131</b>



## ACRÒNIMS

<b>AC</b>	Corrent Alterna
<b>ACW</b>	Antral Contraction Wave
<b>CAD</b>	Disseny Assistit per Ordinador
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>CMM</b>	Complex Mioelèctric Migratori
<b>DC</b>	Corrent Contínua
<b>DGM</b>	Dynamic Gastric Model
<b>DIY</b>	Do It Yourself
<b>FI</b>	Factor Intrínsec
<b>FPGA</b>	Field-Programmable Gate Array
<b>HCl</b>	Àcid Clorhídric
<b>HGS</b>	Human Gastric Simulator
<b>HMI</b>	Human-Machine Interface
<b>I2C</b>	Circuit Inter-Integrat
<b>IDE</b>	Entorn IDEntegrat de Desenvolupament
<b>IO</b>	Input/Output
<b>LCD</b>	Pantalla de Cristal Líquid
<b>LES</b>	Large Eddy Simulation
<b>PBR</b>	Packed-Bed Reactor
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>PDMS</b>	Polidimetilsiloxà
<b>PLC</b>	Contralador Lògic Programable
<b>PVC</b>	Clorur de polivinil

**PWM** Pulse Width Modulation

**RBT** Reglament de Baixa Tensió

**REB** Ritme Elèctric Bàsic

**SLA** Estereolitografia

**SMA** Metall amb Memòria de Forma (Shape-Memory Alloy)

**SPI** Serial Peripheral Interface

**TIM-1** TNO gastro-Intestinal Model 1

**uC** Micro Controlador

**UC Davis** Universitat de Califòrnia Davis

**UIB** Universitat de les Illes Balears

## INTRODUCCIÓ

A l'actualitat, s'estima que entorn de 1900 milions d'adults pateixen sobrepès, mentre que en infants menors de 5 anys aquesta xifra és de 50 milions. Per altra part, 462 milions d'adults pateixen de malnutrició i s'estima que 528 milions de dones (el 29% de les dones en edat reproductiva) pateixen d'anèmia [1].

A mesura que es va aprofundint en la matèria, s'observa que els llaços entre patrons dietaris i la salut són cada vegada més sòlids. Això ha propiciat l'inici d'una tendència de conscienciació alimentària, corrent que destaca per la cerca d'aliments que continguin ingredients funcionals, en una indústria alimentària que tradicionalment ha tingut un posicionament antagònic. Degut a aquesta creixent demanda, la indústria alimentària està virant cap al mercat d'aliments saludables i amb propietats beneficioses (antioxidants, amb alts nivells de fibra, sense sucres afegits...) [2].

Aquestes dades reflecteixen la importància de la recerca en el camp de la medicina digestiva i la indústria alimentària. En especial, poder modelar el comportament del cos durant el procés de digestió gàstrica permetrà dur a terme avanços científics importants, evitant així els estudis in vivo, utilitzats freqüentment i en alguns casos inviables.

### 1.1. Motivació

L'estudi del procés digestiu in vivo és tècnicament complicat, costós i també limitat per raons ètiques, principalment en aplicacions de substàncies que són potencialment nocives com els estudis d'absorció de medicaments per via oral. Conseqüentment, existeix la necessitat real d'utilitzar models in vitro que imitin de manera flexible, precisa i reproduïble els processos que ocorren durant la digestió.

Per altra banda, els experiments de digestibilitat in vitro suposen una útil aproximació per abordar l'estudi de la influència dels factors implicats en la digestibilitat de diferents productes (com la grassa, el sucre o aliments rics en proteïna) ja que permet la reproducció del procés de forma controlada i reproduïble [3] [4]. D'aquest mode, és possible conèixer l'estat de la reacció en cada punt del procés i atribuir els resultats

únicament a les condicions de l'anàlisi [5]. De manera oposada, en els estudis in vivo, habitualment s'avalua sols el punt final de la reacció, ja que la monitorització continua in vivo (tant en humans com en animals) pot ser tècnicament complicada, de difícil realització, costoses i poden presentar dilemes ètics [6].

### 1.2. Objectiu i abast

El principal objectiu d'aquest treball és l'estudi i disseny d'un sistema que permeti reproduir el procés de digestió gàstrica en humans i que, a diferència dels digestors habituals, sigui capaç de realitzar el moviment peristàltic de barreja i fragmentació dels aliments, present a l'estómac.

Podem dividir aquesta meta principal en una sèrie d'objectius més específics:

- **Formació sobre el procés de digestió gàstrica:** Un estudi en detall sobre el procés de digestió en humans serà imprescindible per poder determinar els paràmetres involucrats i que han de ser controlats.
- **Recerca sobre les tecnologies disponibles:** Determinar en quin estadi es troba el mercat de digestors gàstrics i les diferents topologies existents, així com les fortaleses i restriccions de cada un d'ells.
- **Modelització del moviment de peristalsis:** A nivell diferencial, s'aprofundirà en l'estudi del peristaltisme i es proposarà un sistema capaç d'emular aquest moviment.
- **Disseny d'un prototip de digestor:** A partir dels paràmetres de control i els requisits d'ús, dissenyar un equip que pugui ser emprat amb finalitats de cerca i a mode de prototip.
- **Fabricació i assemblatge de l'equip:** Materialització de la feina de recerca i disseny, per poder ser estudiat i analitzar l'evolució de determinats aliments en el procés digestiu.
- **Valoració econòmica de la recerca:** Elaborar un compendi dels costos derivats del projecte, per valorar la viabilitat econòmica i comparar-los amb altres propostes.

### 1.3. Estructura

Els diferents continguts introduïts en aquest treball es distribueixen en set capítols, estructurats de la següent forma:

**Capítol 2: El procés de digestió gàstrica.** S'aprofundirà sobre els conceptes de digestió. En primer lloc s'explicarà l'estructura física de l'estómac i les divisions funcionals que se'n fan. A continuació es detallaran els processos físics i els processos químics que intervenen per digerir els aliments.

**Capítol 3: Estat de l'art.** En aquest capítol es presentaran les diferents tipologies de digestors, i en especial s'estudiaran els sistemes de reproducció del mecanisme de barreja i fragmentació derivada del moviment peristàltic.

**Capítol 4: Modelització del sistema.** S'indicaran els principals requeriments i restriccions del model que s'ha de desenvolupar i es presentaran diferents propostes de disseny. Finalment, es mostrarà el sistema desitjat.

**Capítol 5: Framework.** En aquest capítol, es presentaran els equips que s'han necessitat per fabricar el prototip i les consideracions de disseny derivades d'aquests. Per altra banda, es presentarà com a guia de fabricació, mostrant les diferents etapes de treball de manera individual.

**Capítol 6: Implementació.** Anàleg a una guia d'ús, es detallaran els passos i s'expliquen les consideracions necessàries per poder utilitzar el prototip, detallant les seves funcionalitats.

**Capítol 7: Resum econòmic del projecte.** Es realitzarà una valoració econòmica del desenvolupament a fi de detallar els costos derivats directament d'aquest treball de recerca.

**Capítol 8: Conclusions.** S'elaborarà un compendi del model proposat en aquest projecte i es presentaran algunes propostes de desenvolupament futur.





## EL PROCÉS DE DIGESTIÓ GÀSTRICA

El procés de digestió és el procés biològic de transformació i degradació química dels aliments en nutrients, de manera que pugin ser absorbits i incorporats al metabolisme.

En la digestió gàstrica podem diferenciar dues accions:

- Un procés mecànic: la motilitat gàstrica. Consisteix en els moviments peristàltics de les parets de l'estómac, que mouen els aliments i els mesclen amb els sucus gàstrics.
- Un procés químic: la secreció gàstrica. Es produeix pels sucus gàstrics secretats per les parets internes de l'estómac. Els sucus gàstrics contenen, entre altres substàncies, àcids que actuen químicament sobre els aliments.

En aquest capítol estudiarem els fonaments teòrics del procés de digestió en humans, que és, no altra cosa, el que es vol simular. Aleshores, s'analitzarà en detall el funcionament mecànic i químic de l'estómac en períodes digestius i en dejú.

### 2.1. Motilitat gàstrica

#### 2.1.1. Estructura funcional de l'estómac

Des del punt de vista anatòmic diferenciem tres parts de l'estómac: el fundus, el cos i l'antre gàstric. L'estómac es compon d'una capa muscular longitudinal, una circular i una tercera capa muscular característica obliqua. La musculatura és llisa. Per altra banda, l'estómac està recobert de mucosa que presenta una sèrie de plics gàstrics permetent augmentar la superfície d'absorció (figura 2.1).

<sup>1</sup>El contingut exposat en aquest capítol s'ha basat en la bibliografia recomanada [7] [8] [9] [10] de Fisiologia Mèdica I dels estudis de Grau en Medicina de la Universitat Autònoma de Barcelona [11] i els recursos didàctics de la Dra. Solanas [12].

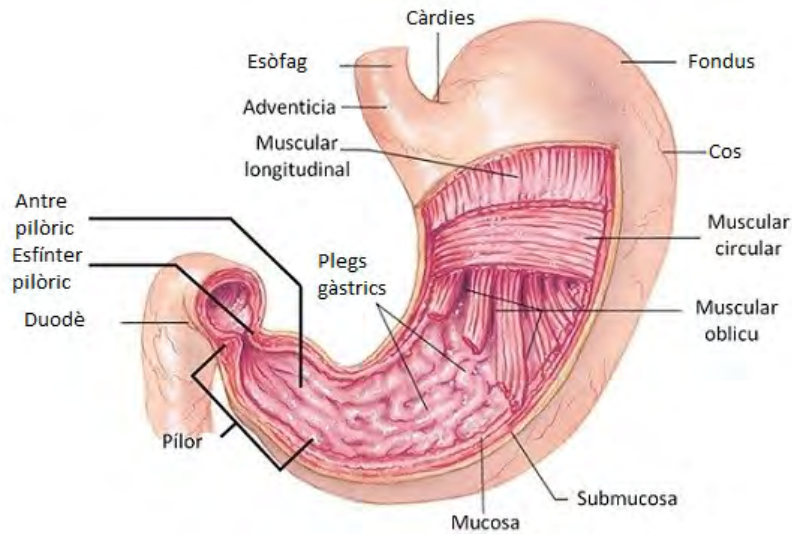


Figura 2.1: Anatomia de l'estómac [7].

De totes maneres, l'estómac també es pot dividir en dues zones diferenciades segons el punt de vista funcional: l'estómac proximal i l'estómac distal (figura 2.2).

L'estómac proximal inclou el fundus i una tercera part del cos gàstric. Es caracteritza per capes musculars fines i la inexistència de ritme elèctric bàsic (REB). Al no haver activitat elèctrica, tampoc hi ha activitat mecànica motora. La funció d'aquesta part de l'estómac és la d'emmagatzemar l'aliment, provinent de la deglució del bol alimentari. Aquesta funció de reservori és possible perquè les parets de l'estómac proximal tenen una elevada distensibilitat, i per tant en un moment donat és capaç de relaxar-se i acollir una important quantitat d'aliment.

Per altra banda, l'estómac distal és aquell que inclou les dues terceres parts del cos (situades a la zona inferior) i l'antre pilòric. Es conforma de capes musculars més gruixudes que les presents a l'estómac proximal, ja que aquestes van augmentant de gruixa a mesura que s'apropen a l'antre. Existeix activitat elèctrica que dona lloc a l'activitat motora present a la zona manifestada a través de contraccions peristàltiques. Hi ha baixa distensibilitat ja que la funció de l'estómac distal no és emmagatzemar aliments, sinó la de fragmentar-lo i barrejar-lo amb els sucg gàstrics; permetent l'evacuació de l'aliment cap al duodè, inici de l'intestí prim.

La separació d'ambdues parts de l'estómac ve determinada per una zona marcapàs, aproximadament al terç superior del cos de l'estómac, zona en la que s'inicia l'activitat elèctrica.

### 2.1.2. L'activitat motora gàstrica i els períodes digestius

La coordinació de l'activitat motora i l'activitat elèctrica de l'estómac depèn del sistema nerviós entèric. El bol alimentari s'ha de fragmentar i barrejar amb els sucg gàstrics per formar el que es coneix com a quim. Per dur a terme aquest procés, l'estómac realitza un seguit de moviments durant el període digestiu, dels quals distingim tres fases:

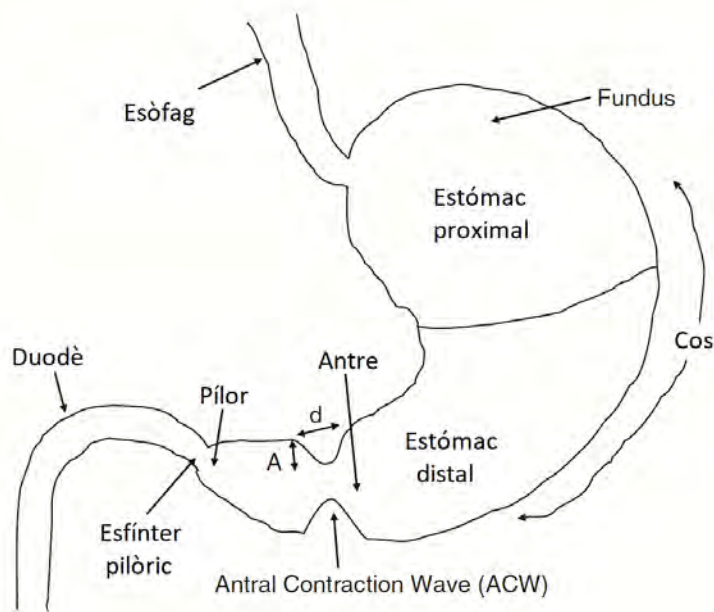


Figura 2.2: Divisió funcional de l'estómac i punts rellevants [13].

- Reservori d'un gran volum d'aliment, a l'estómac proximal.
- Mescla, fragmentació i propulsió del quim.
- Buidament gàstric, pas del quim a l'intestí.

### Reservori

En aquesta fase, també coneguda com acomodació gàstrica, l'estómac proximal actua com a reservori. En un primer instant el bol alimentari es empès a través de l'esfínter esofàgic inferior fins arribar a l'estómac mitjançant el mecanisme del peristaltisme. Donat que l'estómac és molt distensible, el volum intergàstric s'incrementa i deriva en un increment de pressió. Aquesta distensibilitat estimula unes neurones sensibles, mecanoreceptors gàstrics, que donen lloc al reflex vago-vagal. Aquest reflex inhibeix la contracció mitjançant el pèptid intestinal vasoactiu, permetent la relaxació receptiva de l'estómac, augmentant el volum de l'estómac fins a 1,5 L.

L'augment de pressió intergàstrica provoca un determinat grau de sacietat a través de senyals que s'envien a l'hipotàlem.

L'aliment entra a l'estómac i es va dipositant en forma d'anells concèntrics, de manera que l'aliment més antic queda en contacte amb la paret i l'aliment més nou està més en contacte amb el llum de l'estómac. Els aliments es depositen en funció de la seva densitat, per exemple els aliments rics en greixos són els que estan més lluny de la paret i per això es buidaran més tard, cosa que explica la sensació de digestió pesada quan s'ingereixen aquest tipus d'aliments.

La funció de reservori de l'estómac proximal es dona a l'estómac silent, on no hi ha contraccions peristàltiques. Per tant, l'aliment entra a l'estómac i pot estar al reservori aproximadament una hora sense agitar-se ni barrejar-se.



Figura 2.3: Evolució de la peristalsi (superior) segons la senyal de despolarització de les cèl·lules (inferior) [8].

### Barreja, fragmentació i propulsió

La funció de barrejar, fragmentar i propulsar l'aliment té lloc a l'estómac distal a partir de la zona de marcapassos. Això és possible perquè en aquesta zona existeix activitat elèctrica.

A la zona més pròxima al marcapassos de l'estómac distal, comencen a aparèixer ones peristàltiques dèbils que van associades a ones lentes. Les ones lentes peristàltiques són ones amb tres fases: una fase de despolarització, una fase de meseta i una fase de repolarització, tal i com s'observa a la figura 2.3. La contracció gàstrica és conseqüència de la despolarització. Aquestes contraccions peristàltiques dèbils es coneixen com a ones de constricció o barreja, i segueixen un ritme elèctric bàsic de 3 ones/min.

La musculatura circular es fa més prominent i gruixuda a mesura que ens acostem a l'antre. Aleshores, les ones peristàltiques es fan més potents i intenses, convertint-se en contraccions cada vegada més potents fins arribar a l'antre gàstric, on el peristaltisme és màxim i forma anells peristàltics de constricció. Aquest peristaltisme produeix un bombeig, empenyent el bol alimentari contra el pílor, fenomen que es coneix amb el nom de bomba pilòrica. Depèn també del ritme elèctric bàsic, marcat per les ones lentes i per tant amb una freqüència de 3 ones/min. A més de la propulsió, aquest moviment peristàltic també contribueix a la barreja d'aliment.

A part de la bomba pilòrica, el mecanisme de propulsió-retropropulsió antropilòric també contribueix en la barreja. Aquest mecanisme és l'últim que es dona a partir del peristaltisme i bàsicament serveix per realitzar una fragmentació i barreja d'aliment gàstric. A l'esquema (figura 2.4) s'observa el funcionament d'aquest mecanisme. Bàsicament, cada cop que arriba una ona peristàltica potent a l'antre gàstric, el pílor es troba en estat de contracció basal, reduint-ne el seu diàmetre. Aleshores, aquestes ones poden propulsar uns quants mil·límetres de quim a través del pílor, sempre i quan sigui líquid o partícules suficientment petites. Seguidament es contreu, tancant el pílor i deixant de produir-se el buidament. En aquest moment, es produeix el xoc del contingut de l'estómac i es genera una força de retropropulsió (sentit contrari). Cada cop que la ona de contracció arriba al pílor es produeix aquest xoc, produint el moviment de va-i-ve, que no sols ajuda a barrejar el quim sinó que permet fragmentar-lo, fins que assoleixi una mida suficientment petita com per ser evacuat a través del pílor.

Així doncs, aquests tres mecanismes es donen per peristaltisme, fet que implica un

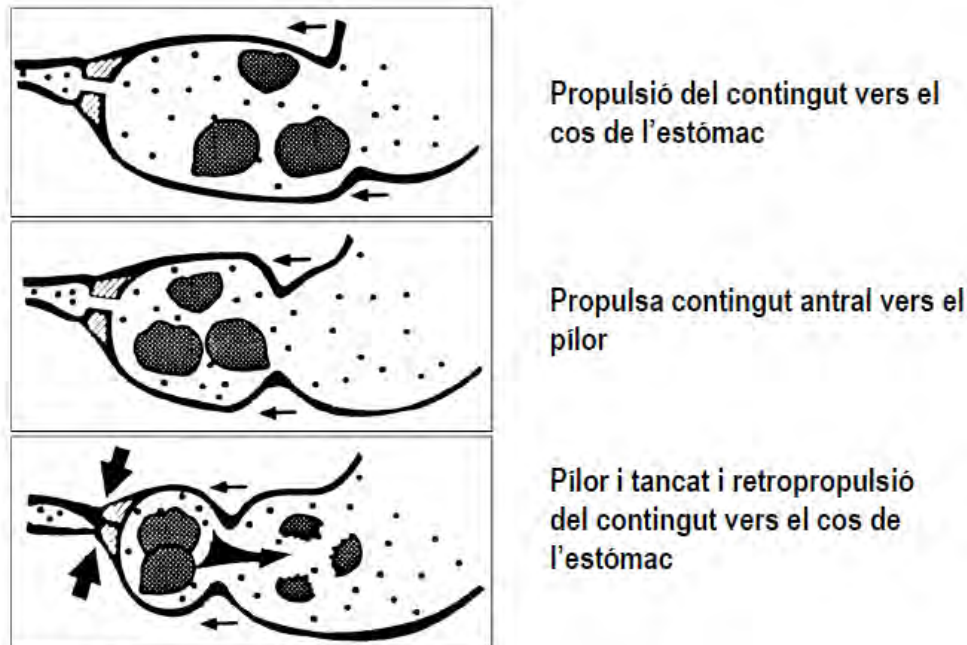


Figura 2.4: Mecanisme de propulsió-retropropulsió antropilòric [8].

control a través d'activitat elèctrica. Aquesta activitat pot ser mesurada, i s'observa com a les diferents zones de l'estómac aquesta varia, segons s'observa al gràfic de la figura 2.5.

Com hem comentat anteriorment, al fundus no existeix activitat elèctrica i a mesura que ens apropem a l'antra pilòric augmenten les ones lentes i la intensitat d'aquestes, sent les contraccions associades més freqüents i intenses. S'ha de recordar, que aquest comportament és el que s'observa empíricament en analitzar el cos humà i per tant no existeix un ritme que es pugui considerar com a fonamental, més enllà del ritme marcat per les ones lentes.

### Buidament gàstric

Un cop el quim està barrejat i fragmentat, es produeix el buidament del contingut gàstric al duodè gràcies a intenses contraccions de l'antra gàstric: el mecanisme de bomba pilòrica ja esmentat.

De tot el temps que l'aliment es troba dins l'estómac, no és mesclat i propulsat cap a l'intestí constantment, sinó que, com hem vist, l'estómac proximal pot fer que l'aliment resti aproximadament una hora en situació de repòs. A més les contraccions rítmiques de l'estómac són gairebé sempre dèbils i serveixen per barrejar els aliments amb les secrecions gàstriques. S'ha calculat que de tot el temps que l'aliment passa a l'estomac sols el 20 % del temps aquest aliment és buidat cap al duodè, a causa de la intensitat creixent de les contraccions que s'inicien a la part mitja de l'estómac i es propaguen cap a la porció caudal. Aquestes contraccions són contraccions potents peristàltiques anulars que buiden l'estómac i generen una pressió sis vegades major que la de les ones peristàltiques de barreja habituals.

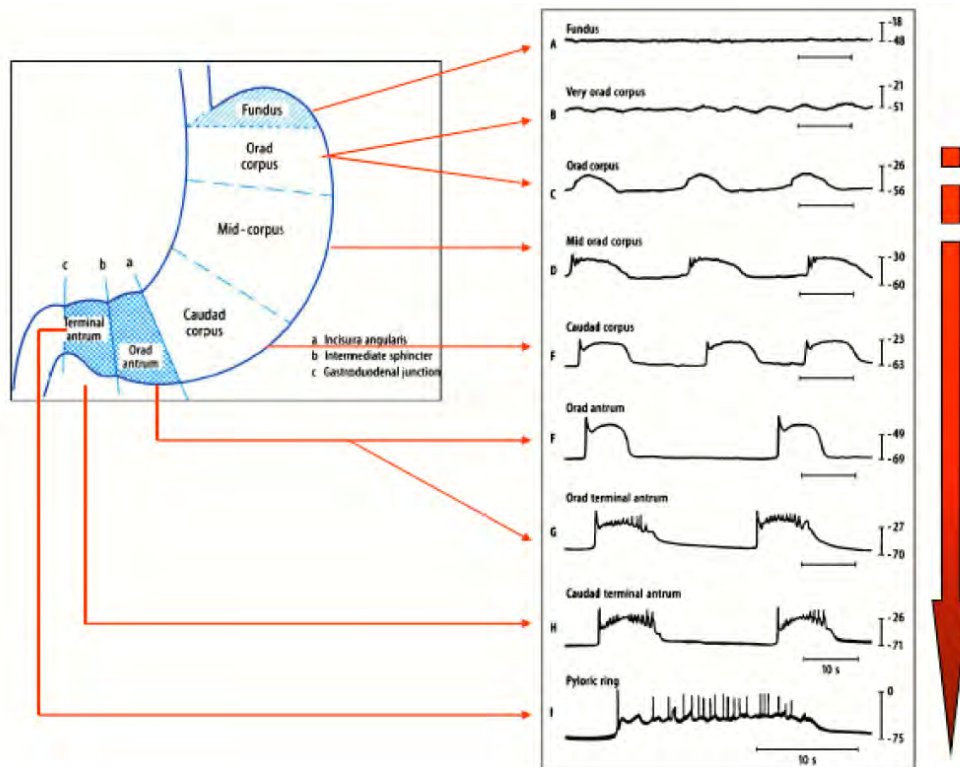


Figura 2.5: Mesures de l'activitat elèctrica per zones gàstriques [8].

Cada cop que arriba una forta contracció de la bomba pilòrica, uns pocs mil·lilitres de contingut passen al pílor i arriben al bulb duodenal. A mesura que l'estómac es va buidant, les contraccions cada vegada apareixen en porcions més proximals i ajuden a empènyer tot el contingut de l'estómac fins que és buit.

La velocitat de buidament és directament proporcional a la intensitat del peristaltisme, és a dir, si tenim una bomba pilòrica estimulada, el buidament és més ràpid, en canvi si la bomba pilòrica va més lenta el buidament també és més lent. Això és el que es coneix com digestions ràpides i lentes.

El buidament depèn de la densitat i la viscositat, de manera que en primer lloc es produeix el buidament dels líquids. L'aigua i els líquids isotònics (sèrums fisiològics) es buiden amb més rapidesa, mentre que els fluids àcids i calòrics trigaran més temps, finalment els continguts més greixosos són els més lents i darrers en buidar-se. Per altra banda, els sòlids han de tenir una mida màxima determinada per poder-se buidar pel pílor, estimant-se que aquesta ha de ser inferior a 2 mm. S'observa doncs que com més intens sigui el peristaltisme, més fragmentació hi haurà, i per tant la velocitat de buidament incrementarà.

### 2.1.3. Els períodes interdigestius i el dejú

Fins aquest moment, s'han tractat els mecanismes presents durant els períodes digestius, és a dir postprandials (després de ingerir l'aliment). Però entre àpats, en dejú, també hi ha activitat motora, que difereix a la present durant la digestió. En aquest



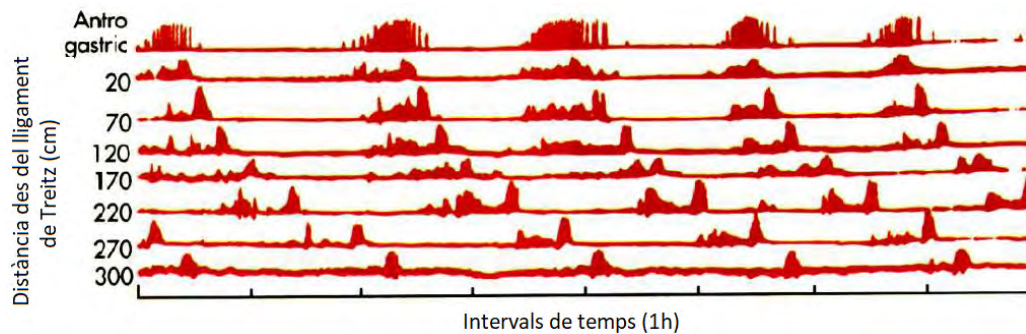


Figura 2.6: Patró de contraccions amb absència d'ingesta segons la zona gàstrica [10].

període de dejú no es realitza el mecanisme de bomba pilòrica ni el de propulsió-retropulsió. No obstant hi ha un altre patró motor per l'estómac i a l'intestí, el qual rep el nom de complex mioelèctric migratori (CMM).

En el gràfic de la figura 2.6 tenim mostres d'un experiment fet en animals, on es registra el patró de contraccions amb absència d'ingesta, des de l'antro gàstric fins a la part més distal de l'intestí prim. S'observa una sèrie de contraccions peristàltiques potents que s'inicien des de l'antro, travessen tot l'intestí prim i arriben a l'ili terminal, afectant uns 40 cm de l'intestí. La durada prevista per aquest grup es troba al voltant de 5-10 min, després d'aquests temps hi ha absència d'activitat motora: silenci elèctric-motor. S'observa que les contraccions tenen lloc durant un període superior a 2 h (100 – 130 min), des de l'origen de les contraccions fins l'intestí, i van preseguides de 90 – 120 min de silenci. Aquest és també el patró típic en humans quan no hi ha ingesta d'aliments.

Si observem en més detall el CMM, hi podem distingir 4 fases [10]:

- Fase 1: hi ha ones lentes amb pocs potencials d'acció i poca propulsió.
- Fase 2: comencen a aparèixer potencials d'acció, fet que implica contraccions més intenses i freqüents.
- Fase 3: màxims potencials d'acció, per tant, màxima força de contracció, és el que hem descrit abans. És la de major activitat elèctrica i propulsora. Dura entre 5 i 10 min.
- Fase 4: fase de silenci motor, fase de no activitat motora o lleu, i aquesta es solapa amb la fase 1 del següent sistema.

Aquest patró de motilitat és el propi dels períodes interdigestius, i sembla que el seu principal control és hormonal a través de la motilina (hormona intestinal) secretada per cèl·lules especialitzades de l'intestí. Només es troba en sang en períodes de dejú (absència d'aliments). Per tant, quan estem en períodes de dejú els nivells de motilina augmenten, estimulants aquest patró de contracció. Quan hi ha ingesta, els aliments inhibeixen l'acció de la motilina i l'activitat motora dels períodes interdigestius, és a dir, desapareix el CMM.

El CMM té un paper molt important, ja que succeeix en períodes entre àpats i serveix per netejar l'antro i l'intestí prim de possibles restes que hagin pogut quedar de

la digestió anterior. A més, com que la fase 3 té una activitat important (contraccions vigoroses i potents), fa que a la zona entre l'antre i l'intestí prim es netegi, i alhora evita el possible reflux de bacteris del colon cap a posicions més proximal, ja que inhibeix la migració bacteriana colònica cap a l'ili. Per a alguns autors, aquest patró motor és denominat el mestre de les claus de l'intestí, perquè gràcies al CMM es manté net el sistema digestiu.

De fet persones amb alteracions en el CMM (activitat reduïda) pateixen freqüentment infeccions intestinals perquè queden restes d'aliment i els bacteris del colon colonitzen àrees de l'intestí prim que no haurien. Així doncs, el CMM facilita l'escombrat de material (restes aliment) cap al cec, i inhibeix la migració bacteriana colònica vers l'ili.

El CMM no s'ha de confondre amb les contraccions de fam, que són ones peristàltiques que tenen lloc al cos gàstric, i apareixen quan aquest cos resta buit durant hores. Depenen del to muscular (musculatura llisa) de l'estómac, i són més típiques en gent jove que en gent gran. Es poden sentir més o menys segons el to motor de la persona.

### 2.2. Secreció gàstrica i activitat funcional de la mucosa gàstrica

Com hem vist, quan parlem de motilitat l'estómac es diferencia en dues parts: l'estómac proximal (o reservori) i l'estómac distal (on s'hi produeix l'activitat motora: la bomba pilòrica i el buidament). De manera anàloga, des del punt de vista secretor l'estómac es divideix en tres regions tal i com podem veure a la figura 2.7:

- La regió glandular cardial és aquella que conté la regió cardial i la major part del fons.
- La regió glandular oxíntica inclou el cos de l'estómac i part del fons.
- Finalment, la regió glandular pilòrica comprèn l'antre i el pílor.

Els productes que secreten cadascuna d'aquestes regions són lleugerament diferents. Aquestes secrecions són alliberades a la llum de l'estómac, on s'ajunten i formen el suc gàstric. El suc gàstric conté aigua, ions (àcid clorhídric, HCl), mucines, pepsines i també un factor intrínsec. El conjunt d'aquesta secreció representa un volum d'entre 1 L i 1,5 L diaris, que degut a la riquesa d'àcid clorhídric es tracta d'una secreció àcida de pH d'entre 1 i 3,5.

La superfície de l'estómac està recoberta per cèl·lules epitelials que tenen una important activitat secretora. Entre aquestes cèl·lules hi trobam uns porus, coneguts amb el nom de criptes gàstriques, que són l'obertura dels conductes pels quals s'aboquen els productes secretats per les glàndules.

A la regió glandular cardial (figura 2.8) trobam cèl·lules mucoses superficials, capaces de secretar mucines. Aquest moc és viscos i forma una capa poc soluble i immòbil que cobreix la superfície i la llum de l'estómac. A més, un líquid alcalí ric en ions bicarbonats acompanya el moc, que conforma el moc alcalí. La gruixa del moc que cobreix la superfície de l'estómac és superior al mil·límetre, i protegeix les parets gàstriques alhora que contribueix a la lubricació i desplaçament dels aliments. La alcalinitat del moc



2.2. Secreció gàstrica i activitat funcional de la mucosa gàstrica

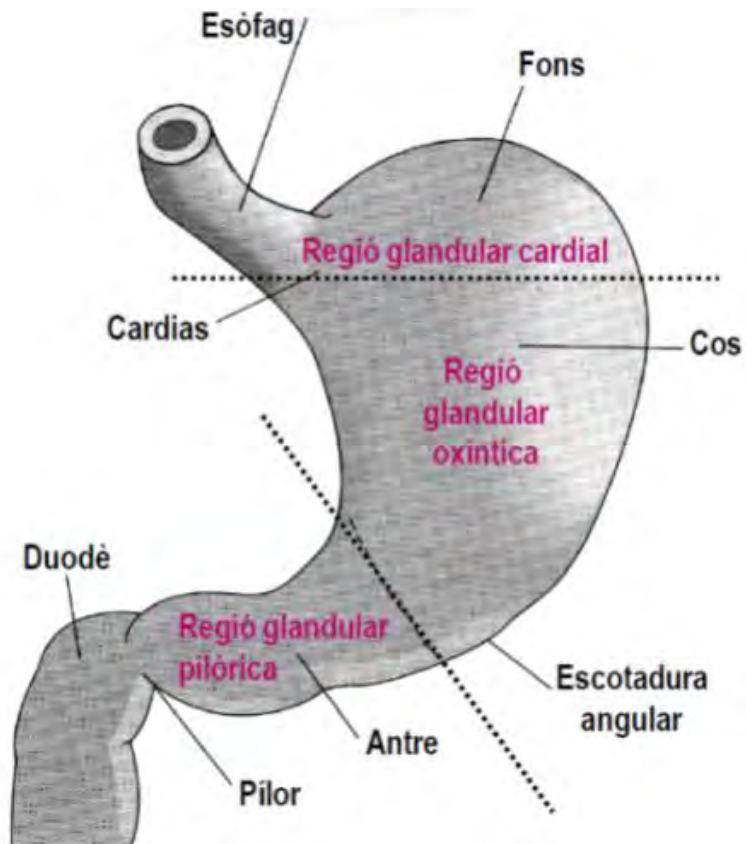


Figura 2.7: Estructura de l'estómac segons activitat secretora [9].

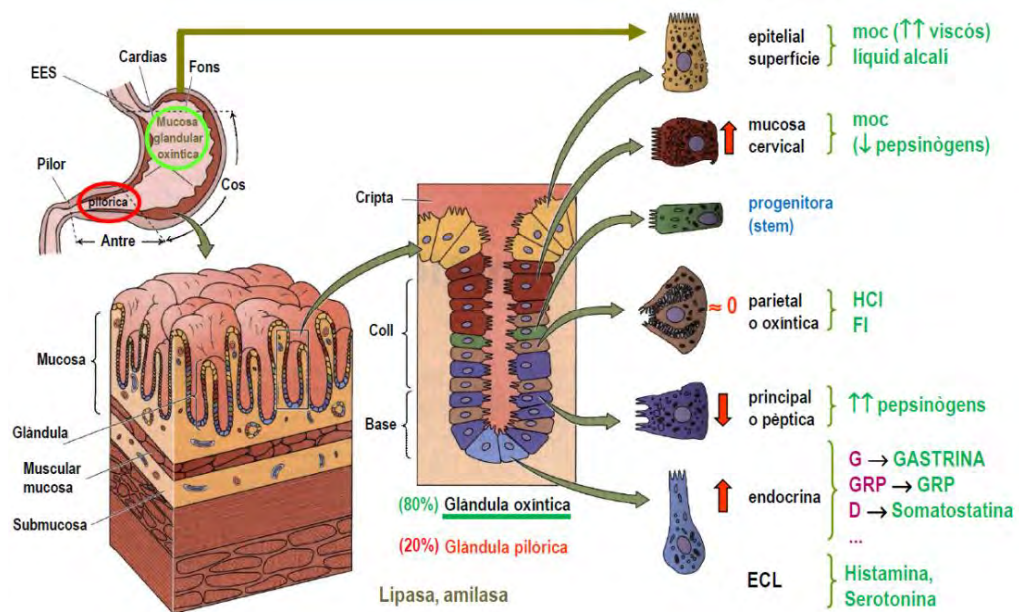


Figura 2.8: Detall de la regió glandular cardial [7].

evita que la paret gàstrica quedi exposada directament a la secreció gàstrica (altament àcida i proteolítica). D'altra banda, si els aliments estan en contacte amb la paret o si aquesta s'irrita, les cèl·lules mucoses reaccionen generant quantitats addicionals de mucosa en aquell punt.

La regió glandular oxíntica és la que ocupa major part de l'estómac, representant les glàndules oxíntiques quasi el 80 % del total de glàndules presents a l'estómac. Les glàndules oxíntiques es poden diferenciar en cèl·lules mucoses superficials, cèl·lules mucoses cervicals (molt menys dens i amb una lleugera quantitat de pepsinògens), cèl·lules mare (permetent la regeneració de cèl·lules i renovant l'epiteli superficial), cèl·lules parietals (secreten HCl i FI), cèl·lules pèptiques (alliberen gran quantitat de pepsinògens) i algunes cèl·lules ECL (que secreten serotonina i histamina).

La regió glandular pilòrica també està recoberta de l'epiteli de superfície i conté les criptes gàstriques. Suposa el gairebé el 20 % de glàndules de l'estómac. Es tracta de les mateixes cèl·lules presents a la regió oxíntica però amb una proporció diferent. Per exemple, trobam moltes cèl·lules mucoses cervicals i cèl·lules endocrines, mentre que trobam poques cèl·lules pèptiques i gairebé cap cèl·lula parietal. Aleshores, en aquesta zona gairebé no hi ha secreció de HCl, FI i pepsinògens, però hi trobam en abundància cèl·lules endocrines que alliberen gastrina, pèptids GRP i somatostatina. Simplificant, la regió glandular pilòrica és rica en molt alcalí i cervical, al contenir baixa quantitat de pepsinògens, HCl i FI, alhora que hi ha un alt nivell d'hormones (gastrina, pèptid GRP i somatostatina).

## ESTAT DE L'ART

Tant en el sector industrial com en el científic, l'ús de simuladors gàstrics està creixent en virtut dels assaigs tradicionals *in vivo*. Existeixen diferents tipus de digestors *in vitro*, des de reactors monocompartamentals estàtics a models multicompartamentals dinàmics. No obstant, tots s'enfronten a la disjuntiva entre complexitat tècnica i la fidelitat respecte el comportament real.

### 3.1. Models estàtics monocompartamentals

Els models estàtics són els simuladors més estesos. Reprodueixen la fase gàstrica mitjançant una hidròlisi per pepsines d'un aliment homogeni, sota unes condicions fixes de temperatura i pH (habitualment pH 1-2, a 37 °C i entre 1-3 h). A continuació, depenent del model, es pot simular en el mateix digestor una fase intestinal involucrant enzims pancreàtics, a un pH d'entre 6 i 7.

La gran majoria d'aquest models són equips senzills, i per regla habitual estan enfocats a tasques específiques, tenint els paràmetres de control prefixats. Alguns models tenen mecanismes per desintegrar i diluir les mostres, però són mecanismes mecànics simples que utilitzen la força de fricció, cisalla o rotació de pales per partir els aliments, allunyant-se del moviment real i per tant poc representatius del peristaltisme present a l'estómac.

Per altra banda, els models estàtics no calquen els processos dinàmics presents a la digestió humana, com el buidament gàstric i la secreció gàstrica, que regula constantment l'evolució del procés digestiu, eliminat els aliments suficientment petits i controlant el contingut àcid.

Aquest n'és el cas del model proposat per Oomen [14]. L'esquema de funcionament és el que es pot observar a la figura 3.1. Aquest compta amb un control fix de temperatura i realitza el moviment amb un *head over heels rotator*.

El principal avantatge d'aquest tipus de digestors és l'accessibilitat i el reduït cost al realitzar un experiment. No obstant, tradicionalment les simulacions amb digestors

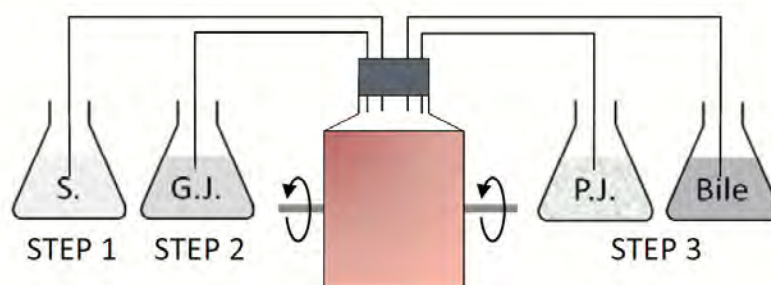


Figura 3.1: Esquema digestor estàtic monocompartamental Oomen [15].

gàstrics monocompartamentals s'han dut a terme sota un ampli ventall de diferents condicions, i per tant impossibilitant la comparació entre resultats. A fi de garantir la homogeneïtat de resultats i estandarditzar el procés neix el protocol INFOGEST 2.0 [16]. Aquest mètode s'ha dissenyat per ser usat amb l'equipament habitual de laboratori i no requereix de coneixements específics. Entre altres especificacions es defineix la composició que ha de tenir el suc gàstric artificial (i que serà homònim al que s'utilitzarà al nostre digestor), sent aquest una solució de concentrat gàstric i aigua (concentració de 1.25x: 4 parts de concentrat + 1 part d'aigua), amb la composició de la taula 3.1:

Composts	Concentració Stock		Stock a afegir preparació 0.4 L concentrat (mL)	Composició concentrat (mM)
	(g/L)	(M)		
<i>KCl</i>	37.3	0.5	6.9	6.9
<i>KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></i>	68	0.5	0.9	0.9
<i>NaHCO<sub>3</sub></i>	84	1	12.5	25
<i>NaCl</i>	117	2	11.8	47.2
<i>MgCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub></i>	30.5	0.15	0.4	0.12
<i>(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></i>	48	0.5	0.5	0.5
<i>HCl</i>		6	1.3	15.6
<i>CaCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub></i>	44.1	0.3	0.005	0.15

Taula 3.1: Composició del concentrat gàstric usat per elaborar el suc gàstric artificial. Volums calculats per produir 400 mL de concentrat [16].

### 3.2. Models dinàmics monocompartamentals

Com a conseqüència de les restriccions dels models estàtics monocompartamentals sorgeixen els models dinàmics, que pretenen tenir en compte l'evolució temporal del procés digestiu. Aquest models reproduïxen, a partir de les dades obtingudes dels models *in vivo*, l'acidificació del contingut gàstric a partir de l'addició d'àcid clorhídric, l'alliberament de pepsines i el buidament gàstric.

El model proposat per Vardakou [17] (el DGM: Dynamic Gastric Model) té en compte la compartimentació estomacal funcional. Està compost per dos compartiments

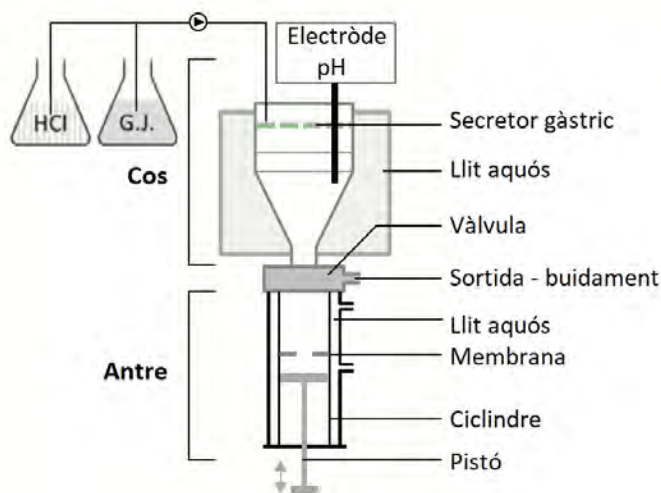


Figura 3.2: Esquema digester dinàmic monocompartamental DGM [15].

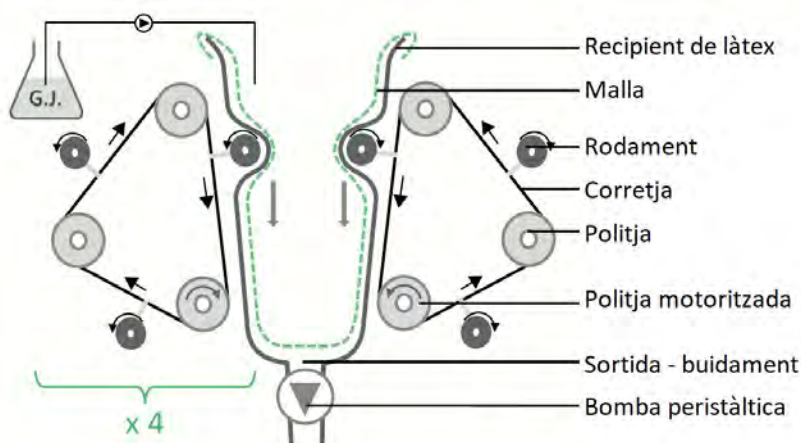
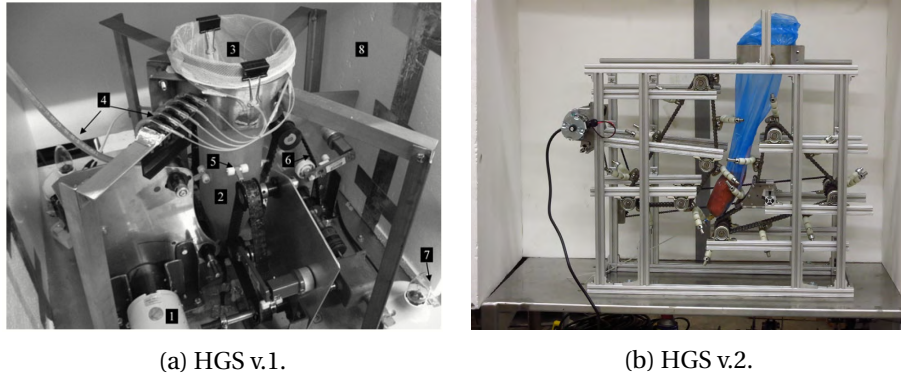


Figura 3.3: Esquema digester dinàmic monocompartamental HGS [15].

successius: el cos, on es mesclen secrecions i aliment, i l'antre, on es troba el moviment peristàltic i la bomba pilòrica. El buidament gàstric és regulat mitjançant una vàlvula que permet l'evacuació de les partícules suficientment petites, mentre que es produeix un reflux de les partícules més grans fins a ser suficientment digerides i evacuades. Aquest model és el que s'observa a la figura 3.2. Tot i la complexitat del model, aquest no reproduïx correctament el moviment peristàltic.

Per pal·liar aquesta limitació, a la Universitat de Califòrnia Davis (d'ara en endavant UC Davis), han desenvolupat un model que sí té en compte les forces peristàltiques presents a l'estómac [18]. La seva proposta, anomenada Human Gastric Simulator (HGS), està composta per una cambra de làtex a la que se li apliquen les forces peristàltiques a partir d'un mecanisme de transmissió mecànica, tal i com es pot observar a la figura 3.3.

Aquest model és el que ha motivat el desenvolupament d'aquest projecte, i per tant, podríem dir que el projecte desenvolupat a la Universitat de les Illes Balears es basa directament en el de la UC Davis, arrel de la col·laboració entre ambdues institucions.



(a) HGS v.1.

(b) HGS v.2.

Figura 3.4: Human Gastric Simulator - UC Davis.

Com s'ha dit, el HGS permet simular en amplitud, intensitat i freqüència el comportament peristàltic humà, a més de disposar d'un compartiment que es comporta geomètricament i funcionalment igual que l'estómac humà. No obstant, el mecanisme de politges i corretges que utilitza és mecànicament complex, sent necessari un correcte manteniment així com un calibrat mecànic cada cop que s'utilitza el digestor.

Annexat a aquest document, es presenta una gravació facilitada per membres de la UC Davis en el que es veu el digestor en funcionament, així com el comportament del mecanisme que s'empra per simular les forces peristàltiques. El model proposat per la UC Davis, tot i basar-se sempre en el mateixos principis i mecanismes, ha sofert canvis des de la versió inicial proposada l'any 2015 pel professor R. Paul Singh (veure figura 3.4a), sent la més actual la proposada per la professora Gail Bornhorst (veure figura 3.4b), qui ha col·laborat estretament amb el disseny del digestor d'estudi en aquesta memòria.

### 3.3. Models dinàmics multicompartamentals

No obstant, tot i que els models dinàmics compartamentals són rellevants pels estudis de digestió gàstrica, sols possibiliten l'estudi del comportament gàstric i no tenen en compte el comportament intestinal en el procés de digestió. Com s'ha vist, a l'intestí es produeixen funcions digestives importants, tals com la degradació de macromolècules i l'absorció de nutrients. Aleshores, per estudiar l'evolució dels aliments ingerits durant tot el procés de digestió és necessari simular el comportament intestinal i l'evolució de l'aliment durant totes les etapes. Per aquest motiu s'han desenvolupat el que es coneix com a models dinàmics multicompartamentals.

L'únic model que simula completament el comportament estomacal i intestinal de manera dinàmica és el TNO gastro-Intestinal Model 1 o TIM-1 de la Universitat de Laval (Quebec, Canadà) [19]. Aquest model està format per quatre compartiments simbolitzant l'estómac, el duodè, el jejú i l'ili. Aquest model permet parametritzar la temperatura, el comportament àcid gàstric i intestinal, buidament gàstric i ílic, temps de trànsit entre etapes, mescla peristàltica, addició de secrecions gàstriques i absorció d'aigua per diàlisi [20].

El TIM-1, veure figura 3.5, és el model més complet que existeix i s'ha emprat en nombrosos estudis nutricionals, toxicològics, farmacèutics i microbiològics [21].



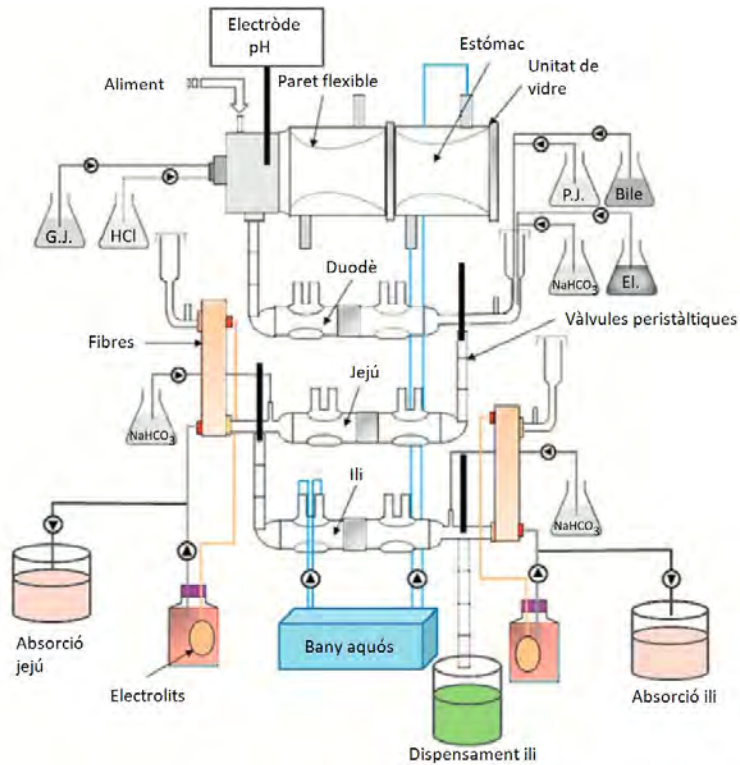


Figura 3.5: Esquema digestor dinàmic multicompartmental TIM [15].

És destacable del TIM-1 el sistema utilitzat per simular el moviment peristàltic. Aquest té com a principi la geometria circular dels músculs estomacals que es tensen i relaxen, provocant una disminució del radi de la llum estomacal. Per simular aquest comportament, s'utilitzen unes parets flexibles circulars (a mode de cambra d'aire) i un sistema d'inflat, que permet reduir-ne el diàmetre intern en introduir aire, i recuperar la forma original amb el buidament de la cambra. Aquest mètode també ha estat estudiat a la Universitat de Auckland a Nova Zelanda [22].

### 3.4. Modelització del peristaltisme

És destacable, que si bé la modelització del comportament secretor és semblant en les diferents arquitectures presentades de digestors, no existeix un mètode comú a l'hora de simular el comportament peristàltic present a l'estómac durant la digestió. S'observa a trets generals dues tendències en el disseny dels digestors: simulació del mesclat mitjançant processos no anàlegs al peristaltisme, i per altra banda mètodes que imiten el comportament de la musculatura estomacal durant el moviment peristàltic.

#### 3.4.1. Mescles no peristàltiques

En el cas dels digestors monocompartmentals estàtics s'utilitzen sistemes que tot i no emular el comportament peristàltic de l'estómac, permeten barrejar l'aliment. Aquests sistemes utilitzen diferents mètodes, d'entre els que destaquem l'ús de:

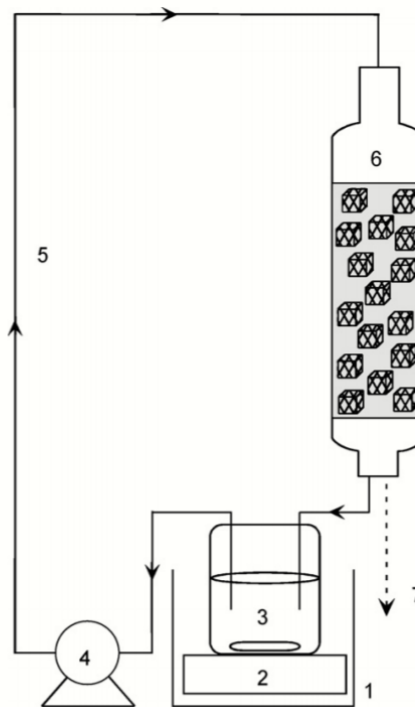


Figura 3.6: Esquema d'una base vibratòria o sistema *Packed-bed reactor* (PBR) [25]. 1) Bany aquós; 2) Base vibratòria; 3) Reservori del reactiu; 4) Bomba peristàltica; 5) Tub TYGON; 6) Columna de vidre plena de cubs de poliuretà; 7) Producte.

### Bases vibratòries

Consisteix en fer vibrar una plataforma (figura 3.6), sobre la qual s'hi situa la cambra de digestió, a mode que la vibració permeti agitar el contingut i mesclar-ho homogèniament [23] [24].

### Mesclat per pales

El procés de mescla es realitza a través de la cinètica d'unes pales situades dins la cambra de digestió i remouen el contingut gàstric. Trobam diferents tipus de pales, ja siguin pales rotatòries respecte un eix central [26] (figura 3.7), com sistemes de pales que funcionen amb mecanismes semblant als d'un pistó [27] (figura 3.8), creant diferents fluxos de circulació (flux axial de la part superior a la part inferior de la cambra, i corrents de convecció forçades, respectivament).

### Rotor mono-multicambra

És el que s'utilitza al digester proposat per Oomen [14] i es pot veure a la figura 3.9. El contingut gàstric es posa en un recipient tancat i se'l farà girar sobre ell mateix. Tot i que es tracta d'un sistema de mescla elemental, permet digerir diferents mostres de manera simultània.





Figura 3.7: Barra agitadora d'acer inoxidable centrífuga de dues pales [26].

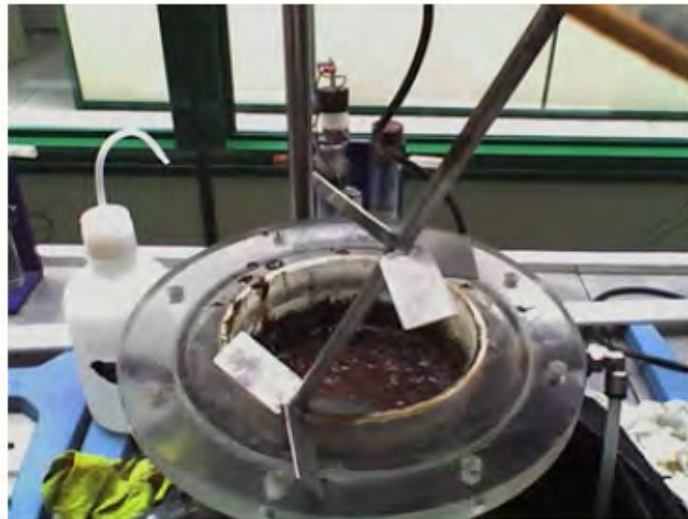


Figura 3.8: Agitador amb doble sistema de pales [27].

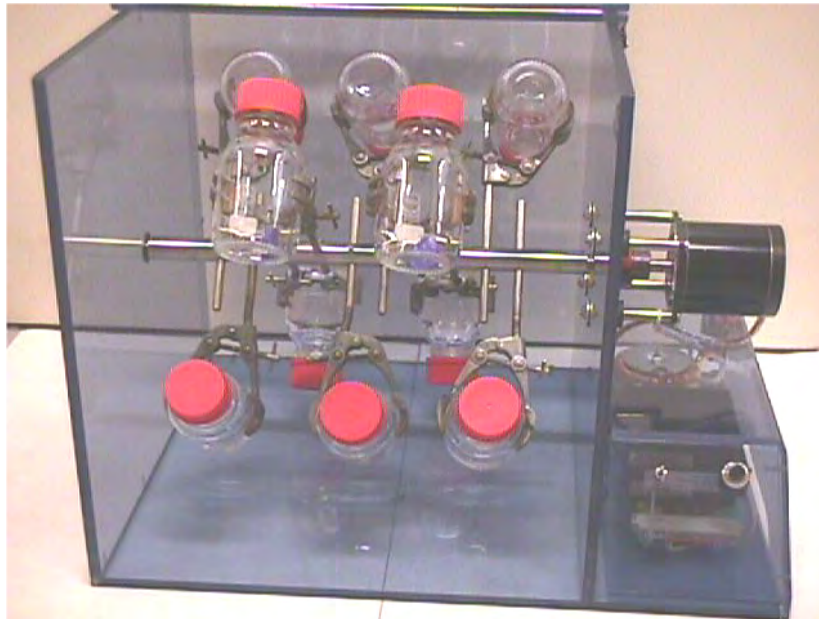


Figura 3.9: Digestor d'Oomen basat en mescla amb un *head over heels rotator* [28].

#### **Agitador magnètic**

És un dels sistemes de mescla més utilitzats en el camp de la química, ja que el manteniment és nul. Els agitadors magnètics són dispositius, que modificant el camp magnètic creant un camp rotatori amb electroimants, permeten moure una barra metàl·lica que s'introdueix dins el vas on s'ha de realitzar la mescla (figura 3.10).

#### **Dispersió turbulenta**

És un sistema que s'empra especialment en reactors de gran escala, especialment en tractament de residus sòlids urbans. El principi del funcionament és la difusió de gas en el recipient, de manera que aquest forci fluxos de convecció del contingut [30]. A la figura 3.11 s'observa el diagrama esquemàtic de quatre dissenys diferents de mescla per dispersió turbulenta, i a la figura 3.12 els resultats de la simulació mitjançant LES (*Large Eddy Simulation*) duta a terme per Karim et al. [31] i Wu [32] per obtenir el camp de velocitats.

#### **3.4.2. Modelització matemàtica del peristaltisme**

Com hem comentat en el capítol anterior, les contraccions peristàltiques tenen origen al revestiment muscular gàstric. Analitzant el treball de Singh i Singh [13] i Ferru et al. [34] [35], es presenta la modelització matemàtica del peristaltisme així com un estudi exhaustiu de simulació del comportament muscular. A la figura 3.13 queda palès la deformació de les parets musculars quan es produeix una contracció.

A l'estudi de Singh [13] també queda reflexat com aquest peristaltisme afecta als vectors de velocitat, quedant clar el funcionament de la barreja gàstrica (figura 3.14) i la



Figura 3.10: Agitador magnètic de Hanna Instruments [29]

ja esmentada bomba pilòrica (figura 3.15), arribant en aquest punt a valors de velocitats de l'ordre de 7.5 mm/s, segons el model matemàtic presentat.

No obstant, el model proposat està limitat en quant a la quantitat de documentació mèdica sobre la que es basa, ja que gran part de la bibliografia mèdica digestiva no comprèn mesures reals del comportament del fluid gàstric, així com les forces existents en les parets musculars, més allà d'aproximacions obtingudes de l'estudi teòric i l'observació empírica en pacients.

Per altra banda, aquest estudi de Singh suposa la validació de la teoria mèdica en la importància del moviment peristàltic del procés digestiu. Queda palès que el disseny d'un simulador gàstric humà que tingui en compte aquest comportament peristàltic és rellevant, ja que els models més bàsics de digestors monocompartamentals no es comportaran de manera anàloga a l'estómac humà.

#### 3.4.3. Bany aquós i peristaltisme per pulsacions (DGM - Wickham)

Pel que fa a mecanismes que simulen el comportament peristàltic, trobam el *Dynamic Gastric Model* (DGM) proposat per Wickham [36], que consta en un receptacle envoltat d'un bany aquós que simula el cos de l'estómac (figura 3.16). Al cos principal del DGM, la mescla no homogènia de l'estómac és reproduïda per lleus contraccions, tres contraccions/min, induïdes per canvis controlats en la pressió aplicada a l'aigua del bany aquós.

Aquest sistema també conté un altre compartiment que simula l'antre. L'aliment pot moure's entre les parts de manera lliure, tal i com succeeix a l'estómac humà, on l'aliment es pot desplaçar entre cos i antre. L'antre està dissenyat per simular les forces

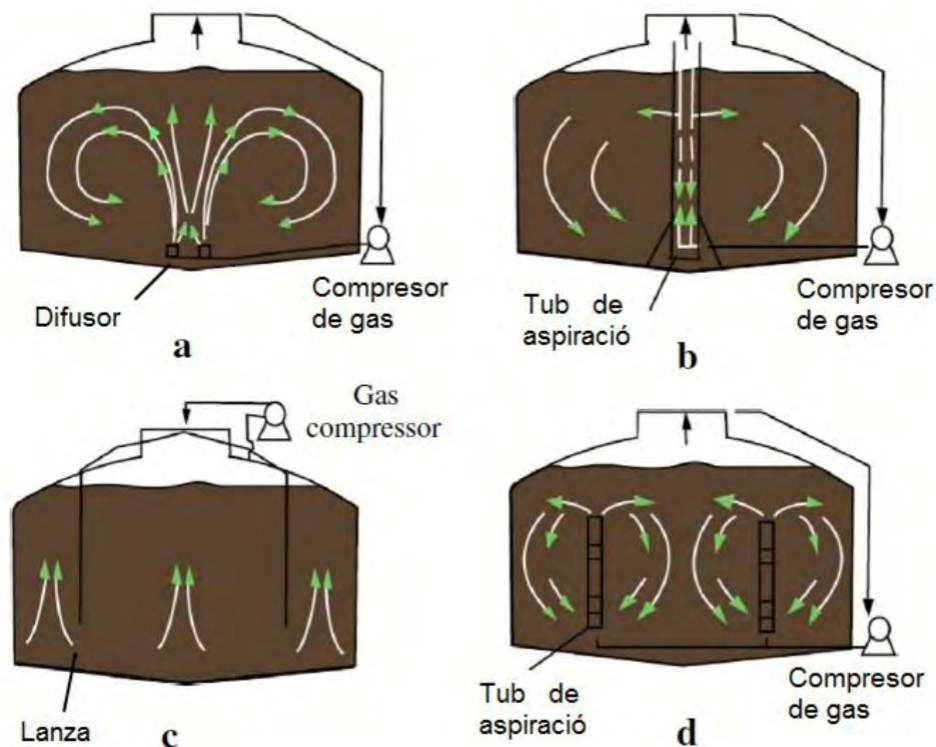


Figura 3.11: Diagrama esquemàtic dels quatre dissenys estudiats per Wu [33]: a) difusors de fons; b) tub central d'aspiració; c) dues llances; d) dos tubs d'aspiració. Imatges provinents de la tesi del Dr. Sánchez [30]

que produeixen l'esquinçament i partició dels aliments observades in vivo. El moviment és produït mecànicament pel desplaçament d'un pistó en una culata, que empeny el material a través d'un anell on és produïx la degradació mecànica selectiva. Un cop l'aliment és processat és alliberat per la vàlvula d'escapament [17].

El DGM està limitat a nivell de volum antral, pel que sol pot processar per simulació 70mL de contingut gàstric. A més, com que el buidament no té control sobre el volum de les partícules de sortida, s'ha de realitzar el buidament indiscriminat. Per això, els autors recomanen que per fer una digestió humana habitual (entre 500 mL i 800 mL de contingut gàstric), es realitzin operacions de 10 min cada una, amb un contingut gàstric de 70 mL, de manera que quan es faci el buidament es deixin tan sols 10 mL del contingut previ i s'hi afegixin 60 mL de la nova mescla. D'aquesta manera, s'han de realitzar entre 8 i 13 operacions per dur a terme una digestió habitual: entre 80 min i 130 min, que correspon el temps habitual de digestió in vivo [17].

Tot i les restriccions d'aquest tipus de moviment, els resultats de la descomposició són positius i molt superiors als que es poden obtenir als digestors que empenyen sistemes de mescla més rudimentaris, tal i com es pot veure a la figura 3.17. En aquesta figura, s'observa el resultat de la descomposició de dues mostres de diferent duresa després de ser sotmeses a la digestió en el DGM i l'USP II [17], un aparell de dissolució que maximitza la desintegració de l'aliment minimitzant la mescla.

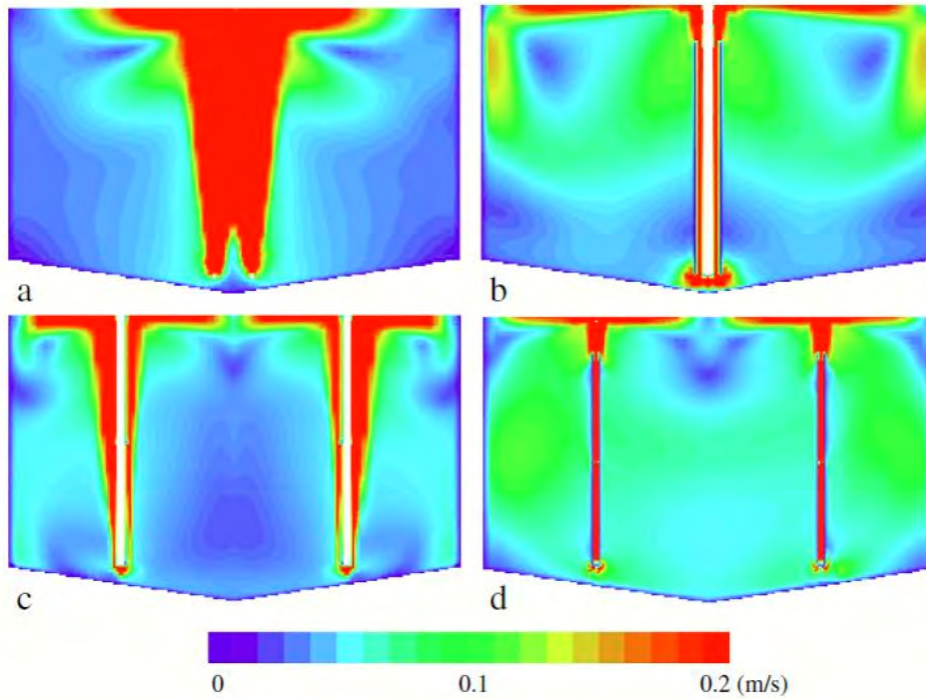


Figura 3.12: Vista frontal de la magnitud de la velocitat de la fase líquida dels quatre dissenys estudiats [30].

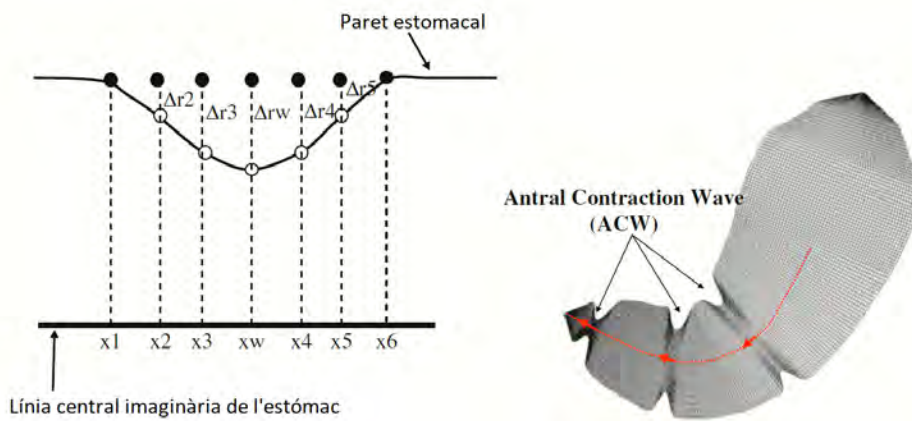


Figura 3.13: a) Digrama esquemàtic describint la deformació sinusoidal a través de la paret estomacal; b) Geometria estomacal amb les ones de contracció antral [13].



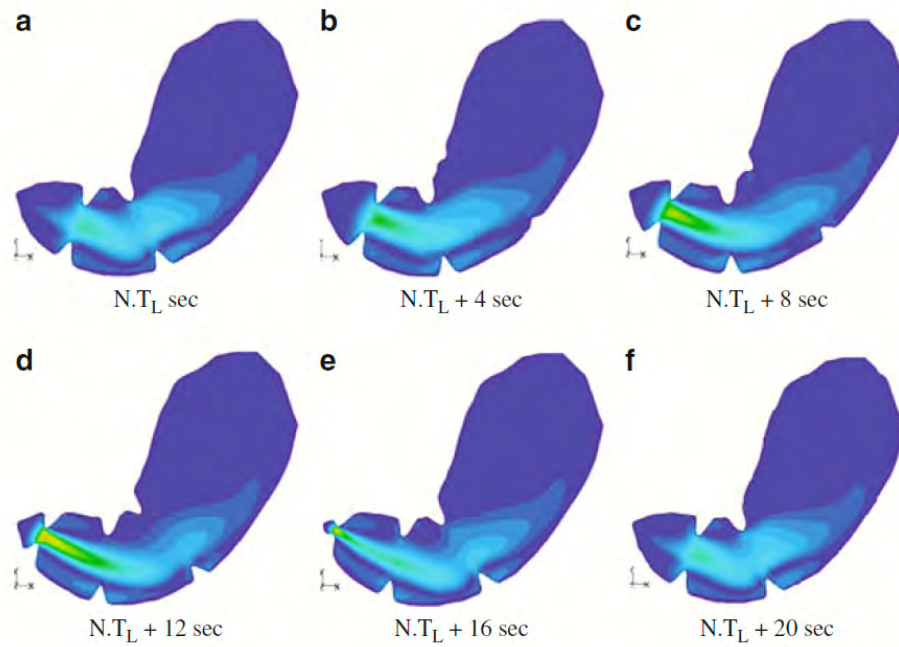


Figura 3.14: Perfils de velocitat a l'estómac a l'aproximar-se una ACW cap al pílör [13].

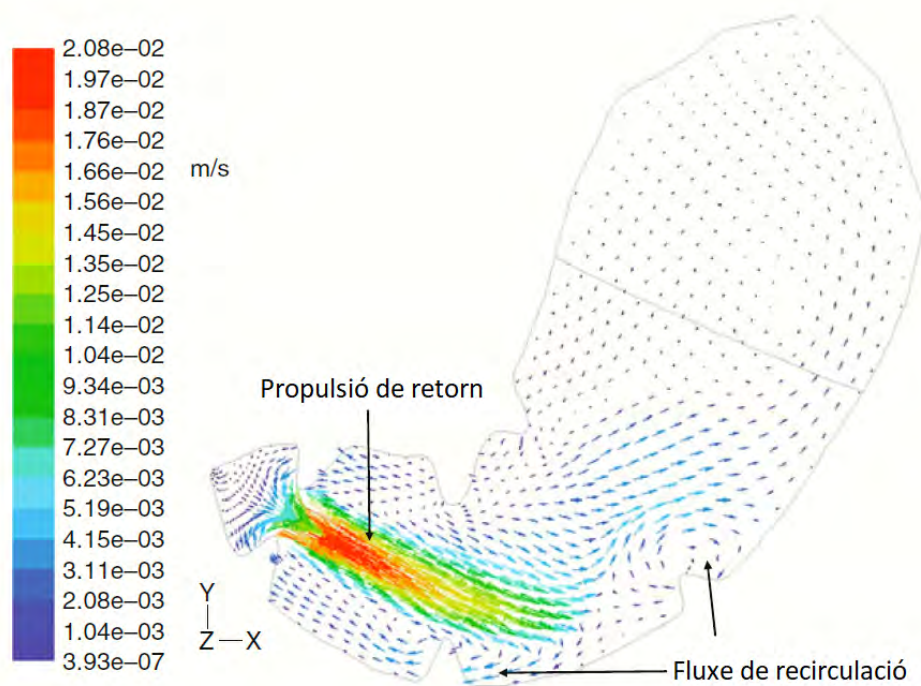


Figura 3.15: Vectors de velocitat (m/s) del fluxe en un estómac humà a  $T(N+1/3)$  s [13].

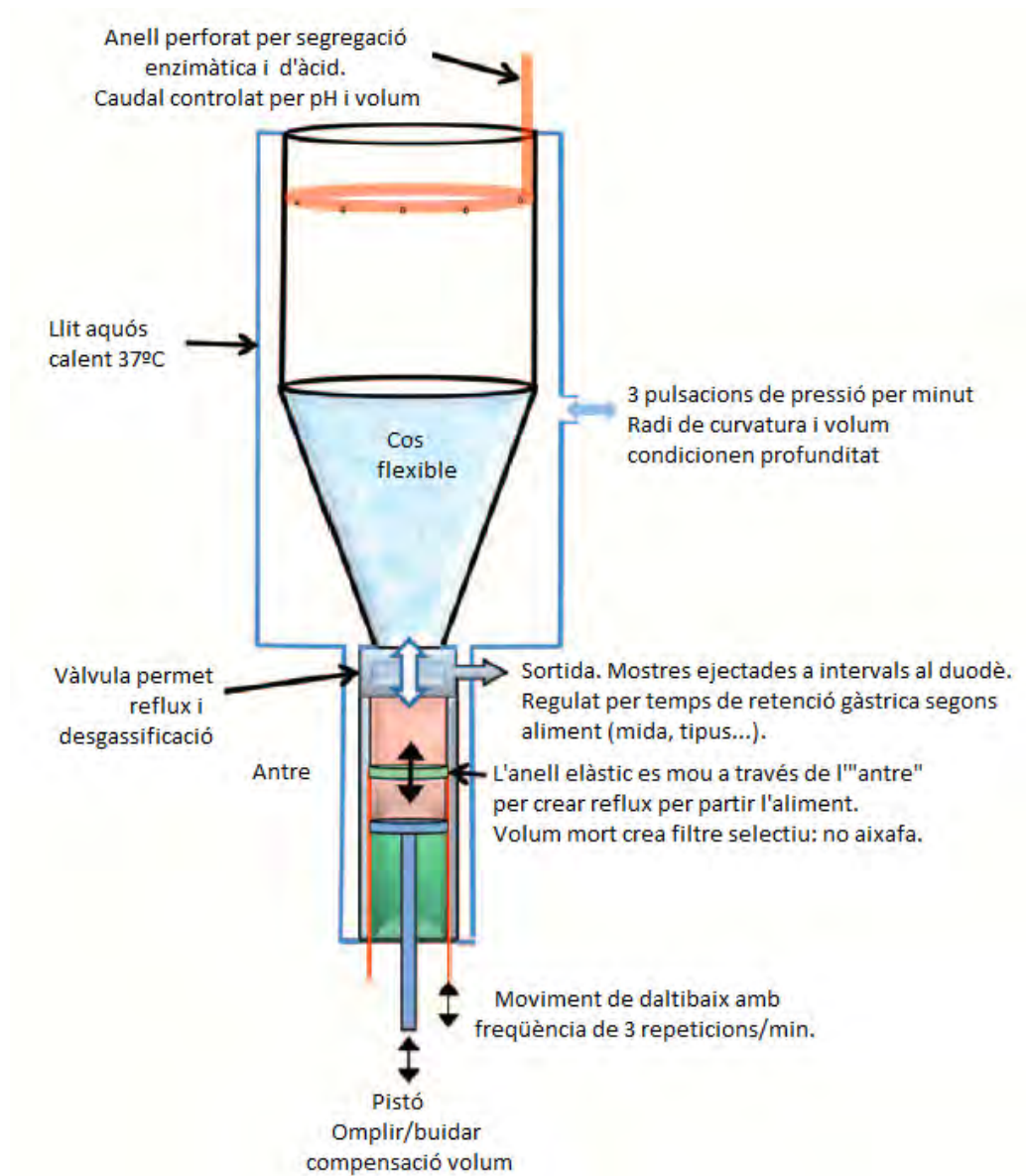


Figura 3.16: Esquema del DGM. Aquest prototip replica el volum intern estomacal d'un humà, operant en els rangs fisiològics [36].

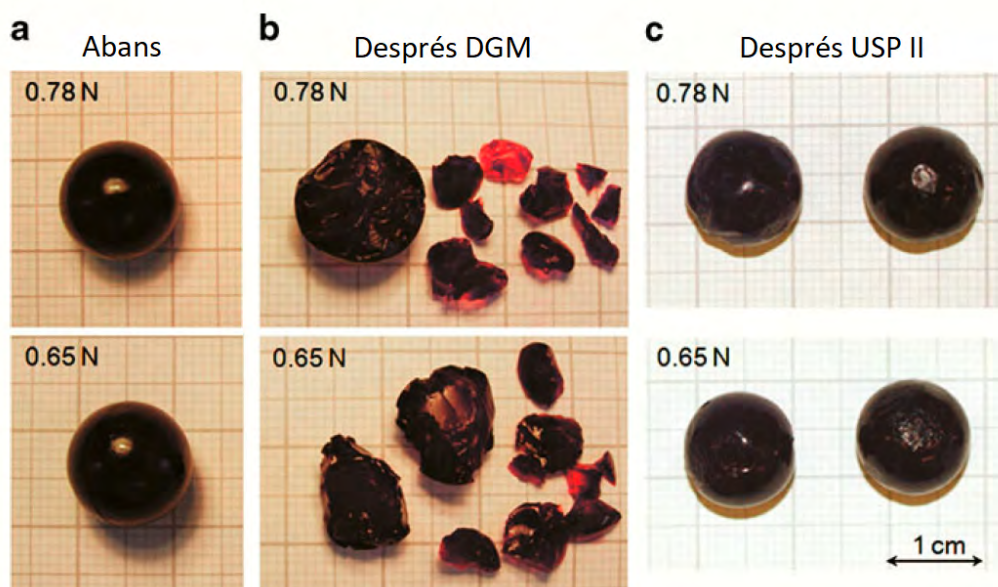


Figura 3.17: Exemple de mostres de 0.78 N i 0.65 N abans (a) i després de ser processades pel DGM (b) i l'aparell de dissolució USP II (c), respectivament [17].

#### 3.4.4. Mecanitzat per pressió i desplaçament (HGS - UC Davis)

Un dels sistemes més avançats per simular el peristaltisme és el proposat per la Universitat de Califòrnia – Davis, en el seu *Human Gastric Simulator* (HGS) [37] [38]. Com s'ha comentat amb anterioritat, el HGS consta d'un únic compartiment de làtex amb forma estomacal, i per tant format pel fundus, el cos i l'antre gàstric, de manera anàloga al que trobaríem al cos humà.

La cambra, de 5.7 L està feta d'una goma de làtex degut a la seva durabilitat i elasticitat, sent un material emprat habitualment en el camp de la veterinària per aplicacions intensives d'emmagatzematge que requereixen de contacte bruscat, i per tant se n'ha d'evitar el trencament.

En la primera iteració del HGS de UC Davis, veure figura 3.18 i figura 3.19, per crear les contraccions peristàltiques s'utilitza un sistema de transmissió mecànic consistent en 12 cilindres o corrons, 4 corretges, eixos de transmissió i sistemes de politges. Cada corretja, empesa per un motor i variador que permet una fluctuació d'entre 2 i 180 rpm, consta de 3 cilindres espaiats de manera uniforme. Aquestes 4 corretges, estan situades segons es pot veure en la figura 3.19 de manera que el cos quedi en el centre d'elles [18].

Quan el motor està en funcionament, els cilindres es mouen de manera simètrica entre ells, veure el detall a la figura 3.20, de forma que realitzen pressió a un punt que es va desplaçant, realitzant 3 contraccions totals (el cicle complet) per minut. Noti's que per evitar problemes de col·lisió, els cilindres estan situats amb una certa desviació, els oposats es troben a la mateixa altura, però els colindants es troben 30 mm més amunt. La posició d'aquests és ajustable, ja que les forces en cada iteració fan que hi hagi un cert joc i s'ha de corregir. Basant-se en el mateix principi trobem el model proposat per Kozu et al. [39] i també el model presentat per Wang et al. [40], considerats entre els models actual més avançats [41].



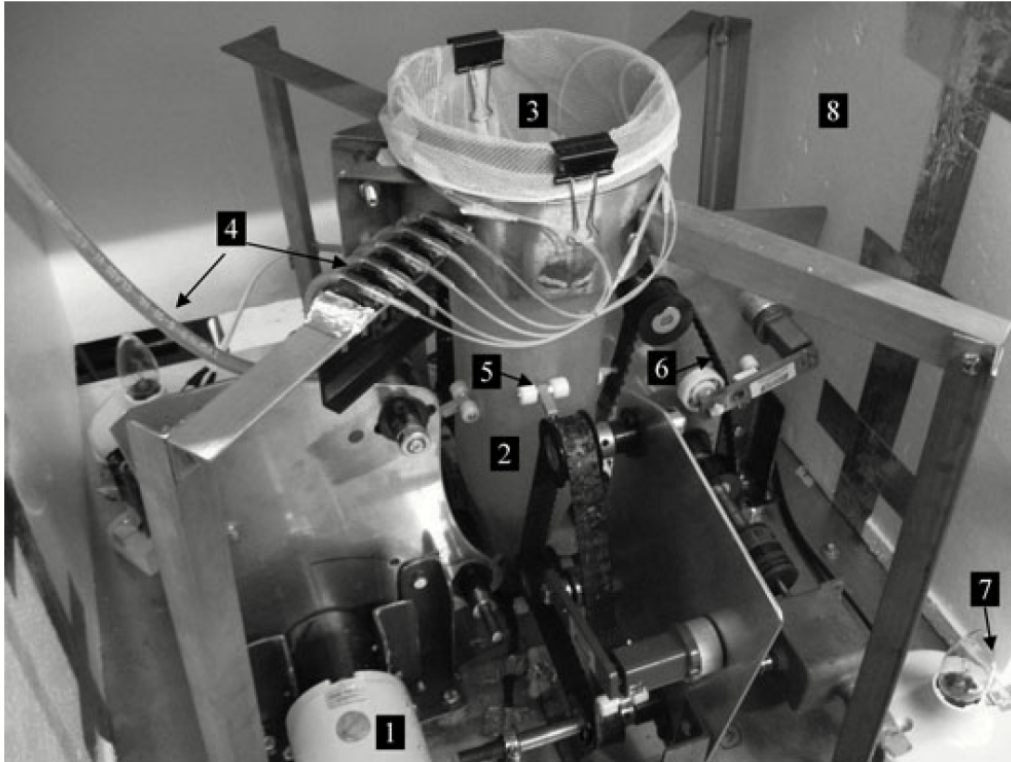


Figura 3.18: HGS v1. 1) Motor; 2) màniga de làtex; 3) bossa interna; 4) tubs de secreció; 5) corrons; 6) corretja; 7) bombeta per regular la temperatura; 8) aillant de poliestiré.

Com s'ha indicat, el model de Davis ha anat evolucionant, existint una segona iteració, sent actualment la més sofisticada. El mecanisme es basa en l'anterior, però en aquest cas només hi ha dues corretges enfrontades entre elles, i enlloc dels cilindres, trobam pinces recobertes de politges, que permeten el lliure desplaçament en el sentit de la corretja, tal i com es pot veure en el model tridimensional proporcionat per la UC Davis (figura 3.21).

Aquesta mecanització permet que l'envolent gàstrica tingui una forma més semblant a la real, incorporant la component inclinació, abans inexistent (fig. 3.22). A més, també s'ha preferit canviar la corretja abans utilitzada per un sistema de doble cadena, tal i com es pot veure al detall de la figura 3.23.

El principal problema d'aquesta sistema és que, si bé modela de manera correcta el peristaltisme, es tracta d'un mecanitzat complex i propens a errors mecànics, pel que s'ha de mantenir constantment i validar abans de cada operació que tots els mecanismes estan degudament ajustats.

#### 3.4.5. Sistema pneumàtic amb control anul·lar (TIM1 - Universitat de Auckland)

Arrel de l'estudi de Singh [13], nombrosos estudis [22] [42] [43] [44] decideixen aprofundir en el modelat dinàmic del peristaltisme, primer mitjançant simulacions discretitzant el comportament i llavors aplicant-lo a l'estudi de materials. Per exemple,

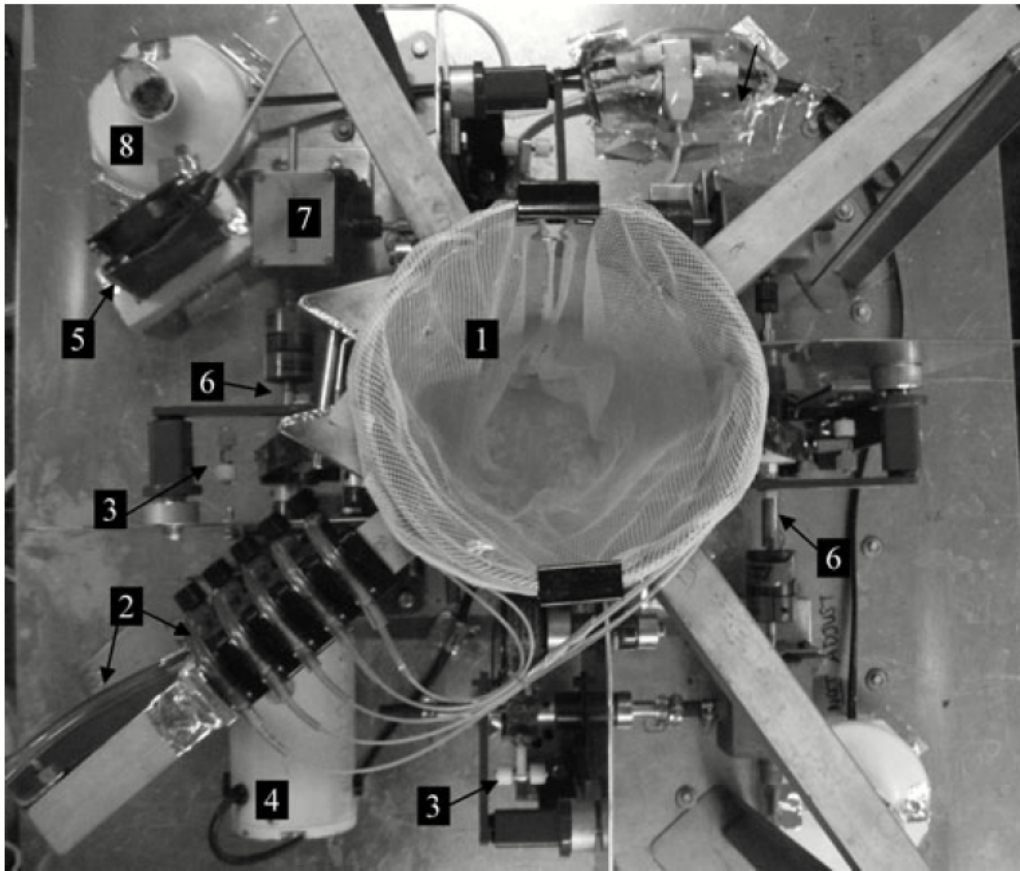


Figura 3.19: Vista superior del HGS v.1. 1) Màniga de làtex amb bossa interna; 2) tubs de secreció; 3) corró; 4) motor; 5) ventilador; 6) eix de transmissió; 7) engranatge; 8) bombeta.

Dang i Cheng [22] proposen l'ús de soft robotics, en el que els materials emprats tenen un important paper ja que permeten realitzar funcions impossibles en la robòtica tradicional. Diferents materials poden ser emprats, com per exemple hidrogel elastomèric, metalls amb memòria de forma (o SMA [45]) i Polidimetilsiloxà (PDMS [46]).

El model proposat consisteix en emprar un sistema pneumàtic que permeti disminuir el diàmetre interior de l'estómac robòtic. A nivell de concepte, si analitzem la figura 3.24, observem que es tracta d'una cambra amb forma d'estómac, que permet inflar les parets.

No obstant, aquesta conceptualització presenta un problema de modelització de la dinàmica, ja que es requereix poder disminuir el diàmetre de forma anular, i que aquest vagi propagant-se per tot l'estómac.

Aleshores, es proposa un model discret format per tres zones diferenciades, tal i com s'observa a la figura 3.25. Cada un d'aquests anells (veure figura 3.26), permet augmentar la mida de la càmera de manera independent (a fi de reduir-ne el diàmetre de l'estómac en aquell punt). Aquesta discretització de l'estómac en tres trams té sentit com a model simplificat, ja que els resultats de la simulació d'aquesta discretització són favorables, però a més, a nivell físic hem vist anteriorment que el peristaltisme es

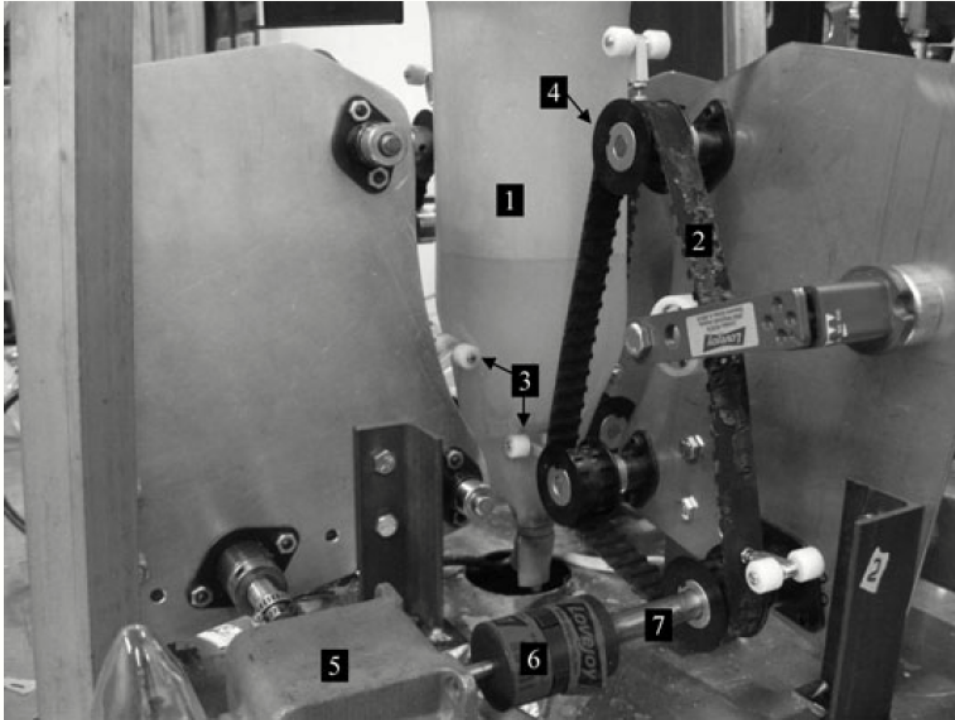


Figura 3.20: Detall del sistema de politges. 1) Cambra de làtex; 2) corretja; 3) corró; 4) politja; 5) engranatge; 6) Unió Love-Joy; 7) transmissió.

presenta amb diferents intensitats d'ona (REB) en tres zones (tal i com vam veure al capítol 2).

Analitzant els resultats de l'estudi [22], veure figura 3.27, s'observa que si bé és possible utilitzar aquest sistema per reduir el diàmetre intern, presenta un seguit de complicacions. Per una banda la fabricació d'aquestes cambres s'ha de fer amb motlles i és un procés en el que garantir la regularitat i qualitat de les peces obtingudes és difícil. Per altra banda, com podem veure en la seqüència temporal d'imatges, durant el procés d'inflat poden produir-se zones irregulars (veure segon 2.25 – 2.50); degudes principalment a les irregularitats en la gruixa de la paret de la cambra, així com un període de règim transitori en la regulació del vector de pressions internes. Finalment, el principal inconvenient que presenta aquest sistema pneumàtic és el limitat rang d'oclusió, ja que experimentalment s'observa que sols s'assoleix reduir el diàmetre en un 40%, mentre que en els models in vivo aquesta oclusió arriba fins al 80%.

Aleshores, es tracta d'un sistema molt interessant, ja que teòricament és una solució que permet un fàcil control i hauria de permetre mimetitzar el comportament real del peristaltisme. No obstant, a la pràctica, ens trobam amb un model que no aconsegueix assolir els requisits del sistema i, per tant, incapaç de simular la mecànica peristàltica i els seus efectes.

Deixar constància que basant-se en aquest sistema pneumàtic, l'estómac del TIM1 [47] utilitza un sistema de dos compartiments amb volum variable per pressió i un anell de degradació (semblant al del DGM, secció 3.4.3), que si bé, no permet realitzar un peristaltisme real, si que aconsegueix resultats de mescla satisfactoris.



Figura 3.21: Model tridimensional del HGS cedit per la UC Davis.



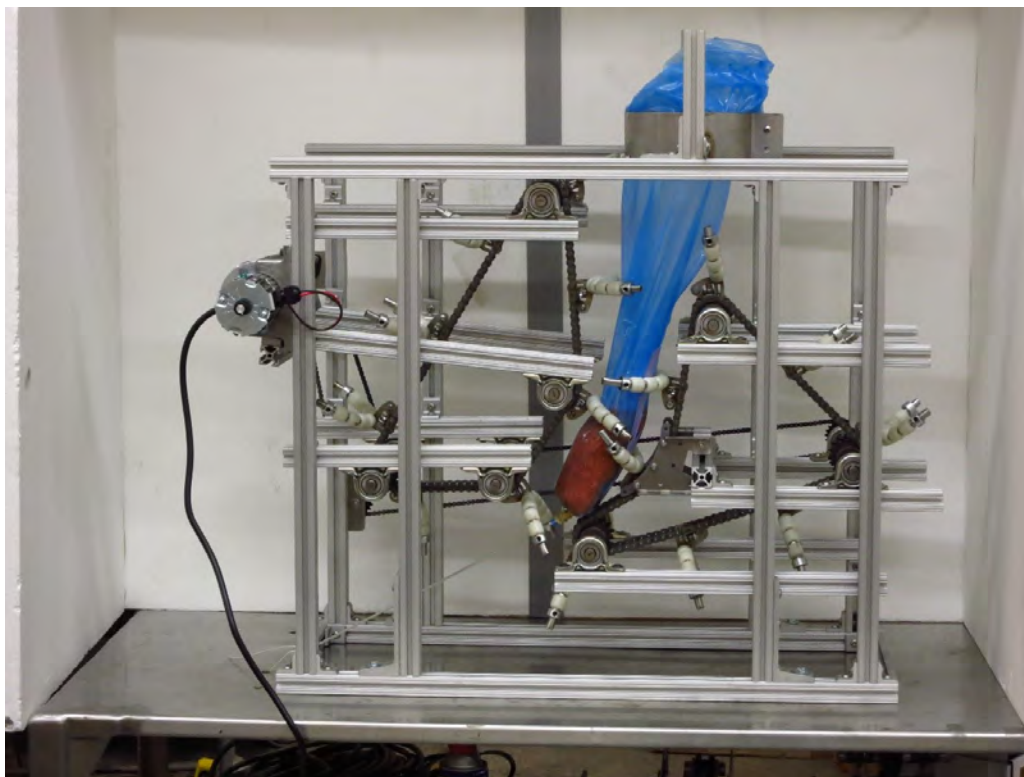


Figura 3.22: Vista frontal del HGS v.2. Imatge cedida per la UC Davis.



Figura 3.23: Detall de la cavitat gàstrica del HGS v.2 en ple peristaltisme. Imatge cedida per la UC Davis.

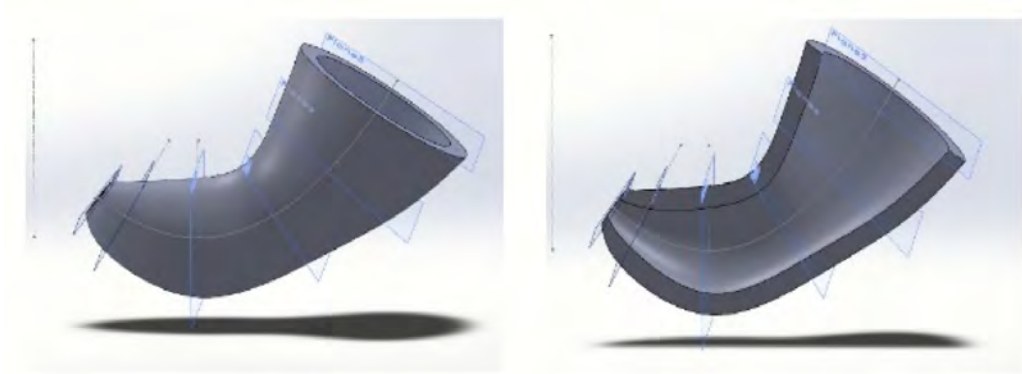


Figura 3.24: Disseny conceptual d'un *soft*-estómac robot [22].

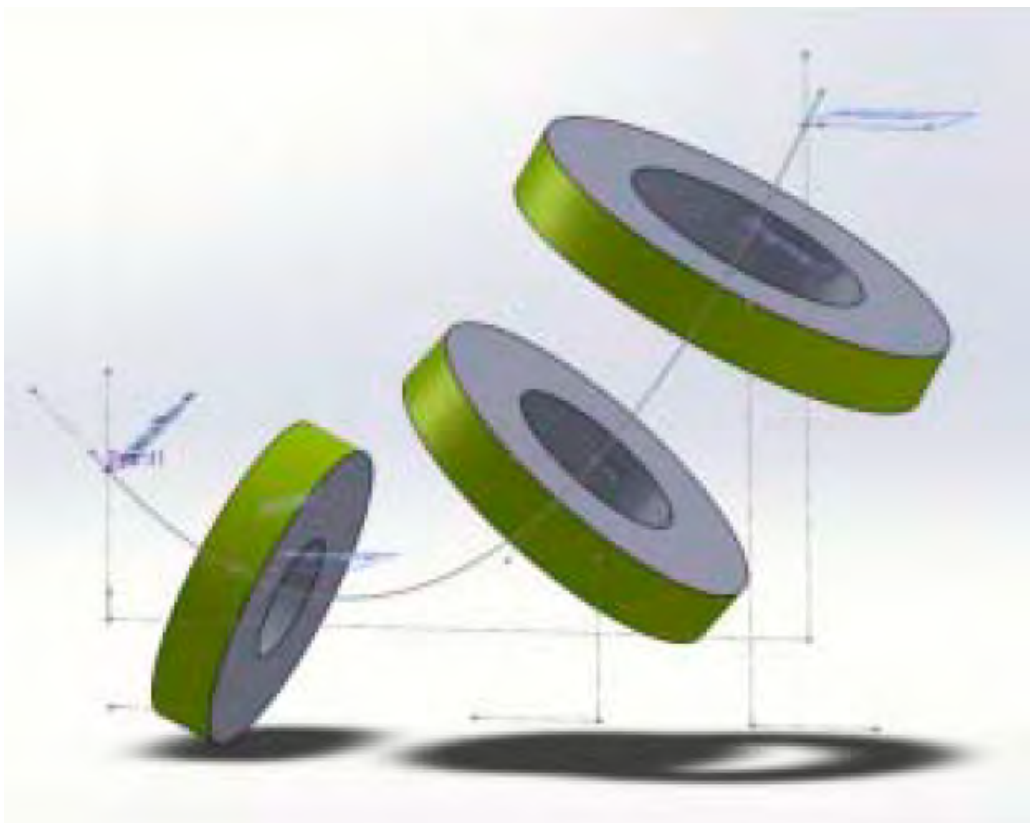


Figura 3.25: El model robòtic d'estómac es compon de tres capes musculars, cada una formada per un únic actuator com el de la figura 3.26 [22].

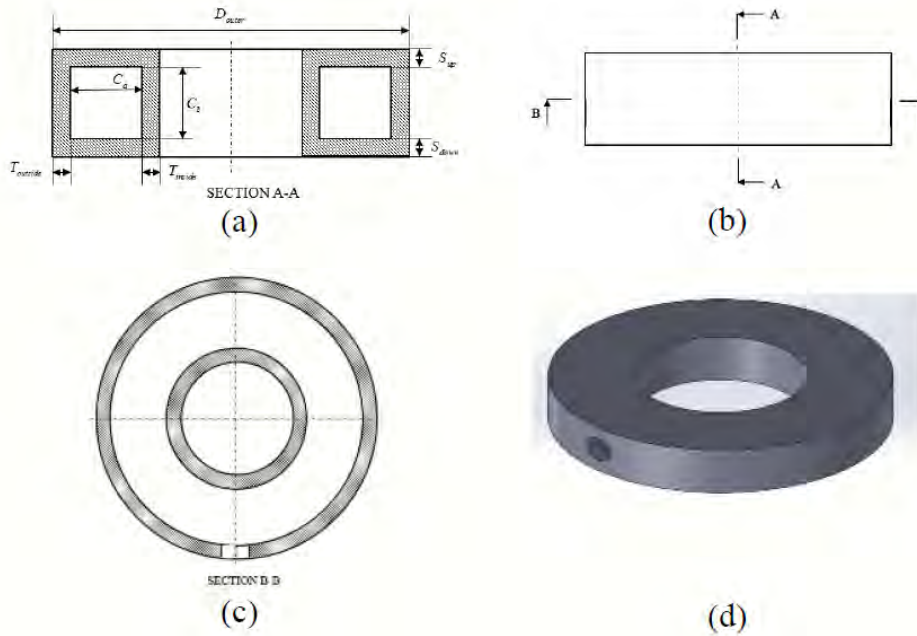


Figura 3.26: Disseny de l'actuador del grup muscular [22].

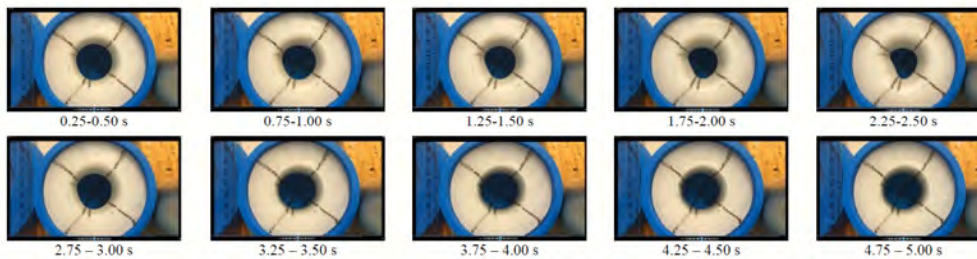


Figura 3.27: Procés de deformació del model de tres capes [22].





## MODELITZACIÓ DEL SISTEMA

En aquest capítol ens centrarem en les consideracions de disseny per a la modelització de la digestió a fi d'assolir els reptes plantejats en la secció 1.2. En primer lloc, analitzarem els requeriments i n'avaluarem diferents propostes de disseny. A continuació, es presentaran les solucions considerades oportunes per la replicació dels diferents mecanismes que apareixen durant la digestió.

### 4.1. Introducció

Com s'ha parlat en capítols anteriors, el principal objectiu d'aquest projecte és proposar un digestor gàstric in vitro capaç de replicar el comportament peristàltic i secretor gàstric en humans. Aleshores, es tracta d'un disseny en el que es prioritzarà la reproducció dels processos en la digestió, i no sols l'obtenció dels resultats d'aquesta.

#### 4.1.1. Descripció del sistema

Com s'ha avançat en altres capítols, el digestor d'estudi es compon de quatre elements diferenciats: el cos gàstric (allà on es realitzarà el procés de digestió), el sistema de peristalsis, el mecanisme de secreció gàstrica i el control de temperatura. Aquesta estructura s'observa a la figura 4.1.

#### 4.1.2. Requeriments i limitacions

El sistema proposat ha d'adreçar una sèrie de restriccions. Com s'ha vist en el capítol 3, els digestors gàstrics poden ser de diferent índole. Com que l'abast de l'estudi no és altre que el del comportament digestiu en la fase gàstrica, no es consideraran models gàstrics multicompartamentals ni cap tipus de model gàstric estàtic.

Per altra banda, al ser un equip que s'utilitzarà amb finalitats científiques, ha de ser un sistema de manteniment reduït i en el que la posta en marxa sigui simple i no requereixi d'un tècnic en tot moment de l'operació.

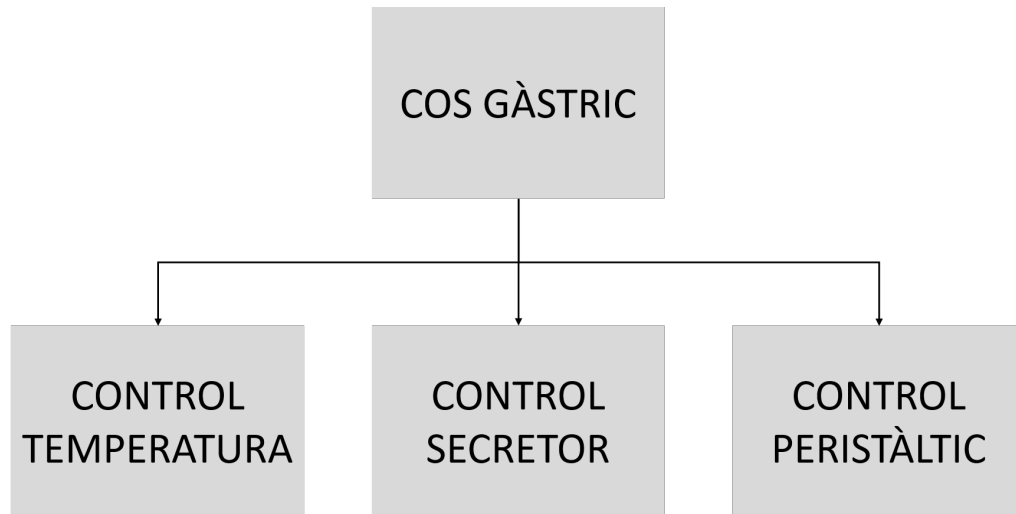


Figura 4.1: Resum estructura del sistema proposat.

Per la mateixa raó, s'espera que la solució proposada sigui la primera iteració desenvolupada a la UIB i que l'estudi dels simuladors gàstrics tingui seguiment dins el grup de recerca d'enginyeria química alimentària. Això implica que s'ha de preparar el sistema per, eventualment, ser ampliat i modificat. Aleshores, els sistemes proposats han de recollir les dades en tot el procés, per poder ser estudiades i avaluar la capacitat del model.

Per altra banda, no es contempla dins l'estudi la modelització de la fase cefàlica i la fase intestinal del procés de la digestió. A més, tampoc es considerarà la pressió com a variable del model, menyspreant els efectes d'aquesta en el procés, ja que la present en humans s'estima igual a l'atmosfèrica. Finalment, indicar que no s'ha tingut en compte la fase d'evacuació d'aliments a fi de simplificar el model, donat que aquest ja comptarà amb un sistema de mostreig de líquid.

## 4.2. Propostes de disseny

Com s'ha vist en el capítol 3, trobam diferents topologies de models dinàmics monocompartamentals. D'entre els quals en destacam els següents sistemes.

### 4.2.1. Sistemes pneumàtics

En primer lloc, trobam models que es basen en sistemes pneumàtics [48]. Aquests sistemes permeten un fàcil control, al tractar-se d'una tecnologia madura àmpliament adoptada en diferents indústries. A més, l'ús de mecanismes pneumàtics permet discretitzar l'espai en molts punts, assimilant-se al moviment continu, podent assolir un comportament pròxim al real.

No obstant, com bé s'indica a l'estudi de Dang [22], la dinàmica dels gasos, especialment l'aparició del règim turbulent, i la heterogeneïtat de les pressions en les cambres, provoquen l'existència d'una component no controlable. Per altra banda, assolir altes

pressions pot suposar dificultats a l'etapa de disseny i en el manteniment dels equips, havent d'evitar qualsevol tipus de pèrdua.

D'entre els sistemes pneumàtics destaca com a solució més viable l'ús de vàries cambres d'aire anulars, concentrades sobre l'eix de l'estómac, i controlades per canvis en les pressions internes.

### 4.2.2. Sistemes hidràulics

De manera semblant als sistemes pneumàtics, els sistemes hidràulics són utilitzats en varies indústries per fer control, i en especial, un dels digestors comercials més avançats [36] utilitza aquest sistema.

La solució més sensible és submergir el cos de l'estómac dins un llit aquós de temperatura controlada amb una resistència. Els peristaltisme es pot simular amb un dispersor d'aigua dinàmic seguint l'eix de l'estómac. D'aquesta manera, la pressió d'aquest anell realitzarà la força peristàltica. Un altre sistema viable és l'ús de varis dispersors d'aquest tipus a l'exterior del cos gàstric, discretitzant els punts de peristaltisme, de manera anàloga al sistema proposat anteriorment.

No obstant, la utilització d'un sistema basat en un medi aquós suposa costos elevats i un nivell de manteniment molt elevat, ja que els mecanisme es deterioraran degut a la corrosió. Per altra banda, assolir la pressió suficient per generar forces de contracció pot suposar un repte de disseny.

### 4.2.3. Sistemes mecànics

Els models basats en sistemes mecànics permeten l'ús de topologies molt variades, cosa que obre un ampli ventall de possibilitats. A l'existir múltiples alternatives de disseny permet experimentar i modificar-les de tal manera que s'assoleixi un comportament pròxim al real i simplificant el control. Un bon exemple, és el cas de l'equip proposat per la UC Davis [18] que permet replicar de manera correcta el peristaltisme i la secreció gàstrica.

De totes maneres, els models mecànics existents presenten grans desavantatges derivats del disseny. Entre d'altres, ens trobam amb sistemes sofisticats de corretges i politges, que s'han de calibrar cada cop que s'ha d'emprar, a més de realitzar un pla de manteniment preventiu de l'equip. Noti's que aquestes solucions presenten el desavantatge d'utilitzar més espai que els sistemes hidràulics.

### 4.2.4. Conceptualització de la proposta

Després d'haver analitzat les tecnologies existents, s'ha considerat que continuar la recerca del grup de la Universitat de Califòrnia amb el HGS és l'opció més adient per als requeriments del projecte. Per una part, el desenvolupament del cos gàstric és satisfactori, i per altra, l'ús de sistemes mecànics tradicionals permetrà que la usabilitat i futur desenvolupament del digestor sigui factible.

No obstant, vist les complicacions derivades del sistema de corretges i politges, el model que es proposarà farà ús d'actuadors elèctrics, discretitzant el punts d'actuació peristàltica.

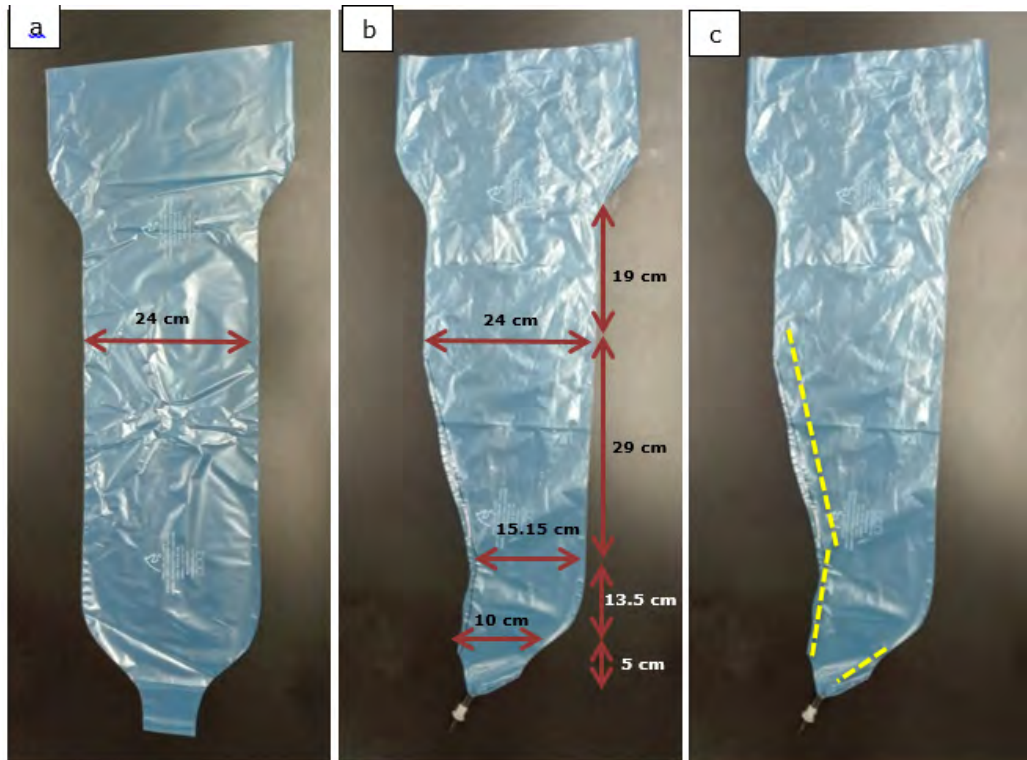


Figura 4.2: Contenidor gàstric: a) Màniga de làtex original, b) Màniga modificada, c) Zones de sellat marcat amb línies discontinues.

### 4.3. Contenidor gàstric

El contenidor gàstric és l'element que replica la forma i funció de les parets gàstriques. Es tracta doncs d'un contenidor amb la forma i propietats del cos gàstric humà.

Desenvolupat a la UC Davis, el contenidor gàstric està fet amb una màniga de làtex d'alta resistència, capaç de mantenir el contingut a pesar de forces de fricció i temperatures corporals. En concret, aquestes mànigues són utilitzades per realitzar recollida de líquid seminal equí [49], i s'utilitzen com a mànigues internes d'un sol ús.

No obstant, per obtenir la forma gàstrica, s'altera la màniga amb un soldador o algun estri calent tal i com es pot veure en la figura 4.2.

### 4.4. Peristaltisme

Per dur a terme el peristaltisme, s'utilitzarà un sistema semblant al proposat per Dang [22]. No obstant, enlloc de seguir els principis de la *soft robotics* i utilitzar anells pneumàtics per recrear el teixit muscular, s'utilitzarà un plantejament més tradicional en robòtica: l'ús d'actuadors lineals electrònics.

Com vam veure en la secció 3.4, el moviment peristàltic es pot discretitzar en diferents anells d'aplicació de forces. Segons Dang, per recrear el moviment peristàltic

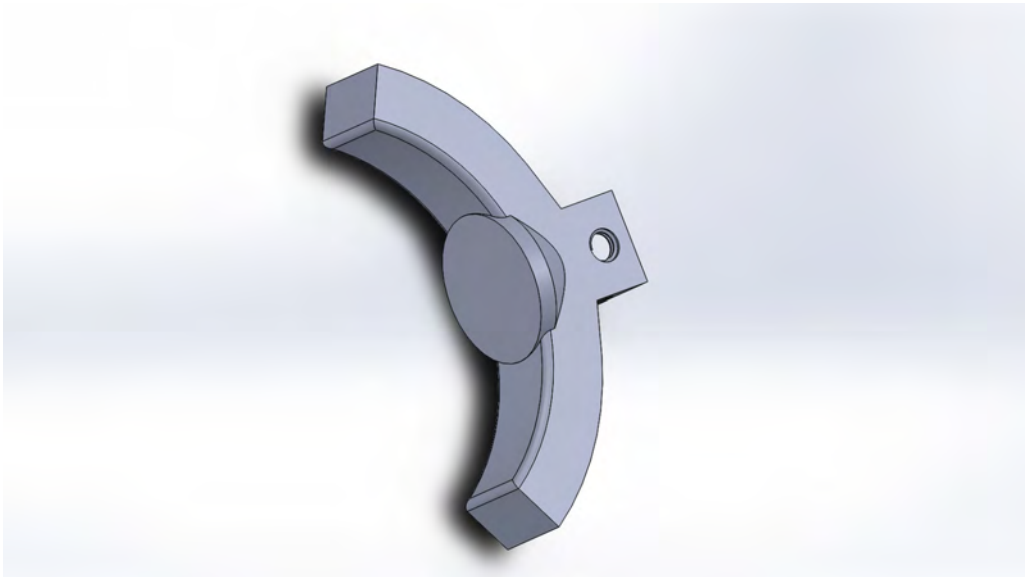


Figura 4.3: Vista del model CAD de la pinça.

es requereix d'almenys tres anells de força repartits en punts concrets al llarg de l'eix del cos gàstric.

Aleshores, per realitzar la peristalsis, s'utilitzaran tres grups musculars, tal i com es pot veure a la figura 4.4. Alhora, per simular cada grup muscular es farà ús de tres actuadors lineals concèntrics i repartits a igual distància entre ells. Aquest actuadors, per repartir la força a través de la superfície de l'anell i no en un sol punt, tindran unes terminacions en forma de pinça circular dissenyades per a tal fi 4.3.

El principal avantatge d'aquesta configuració és el control del grup muscular, ja que es podrà controlar la pressió i velocitat del moviment de cada actuador, permetent un control de la cadència i intensitat del moviment peristàltic, tenint en compte les zones amb més intensitat REB. A més, és un sistema fàcilment ampliable, ja que a posteriori es podran afegir més grups muscular i, en cas d'esquinçament d'alguns d'aquests, les reparacions sols consistiran en el canvi de la peça defectuosa i calibrar la seva posició.

Per altra banda, donat que els actuadors estan situats de manera perpendicular a la tangent superficial, en aplicar la força de contracció, sols tindrem una reacció en direcció oposada, que serà al punt de subjecció de l'actuador. Aleshores, ens evitarem els problemes de forces no tangencials present en el digestor de la UC Davis, que al moure les pinces per la superfície de l'estómac, aquestes es desajusten i per tant s'han de recalibrar cada cop que s'ha d'utilitzar el digestor.

## 4.5. Mecanisme secretor

Al capítol 2, es va estudiar la secreció gàstrica i com aquesta s'utilitza per regular el pH del contingut intraestomacal segons calgui. Sense aliments i en repòs, l'estómac pot arribar a pH inferiors a 1 (envoltant de 0,8); no obstant, en introduir aliments el pH augmenta considerablement, i és la regulació secretora l'encarregada de mantenir el pH entre 1,8 i 4 (veure secció 2.2).

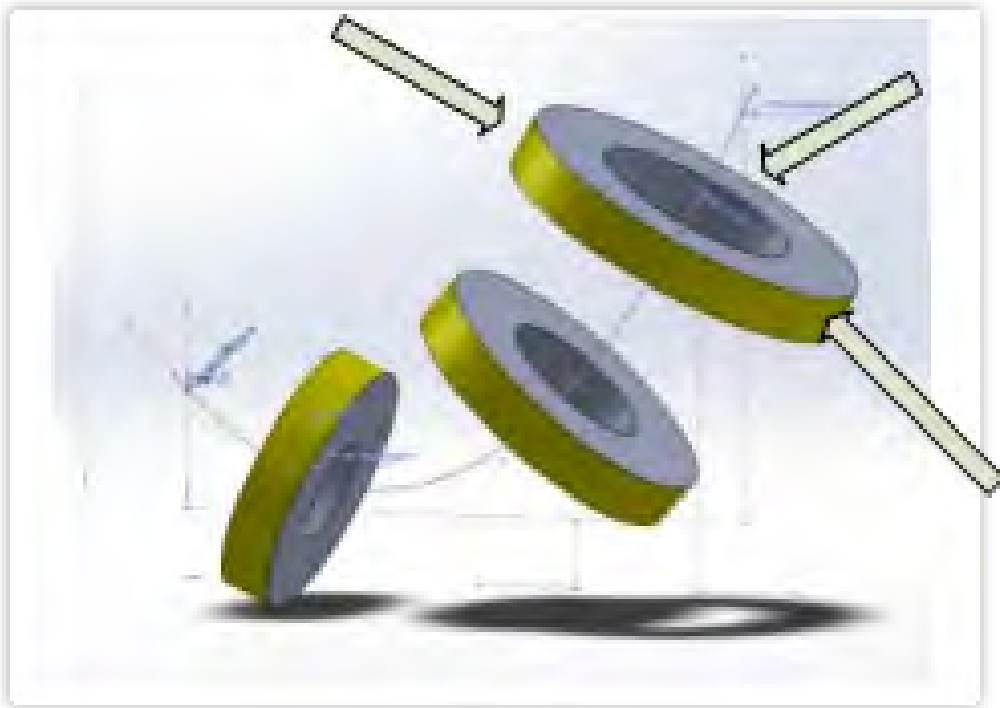


Figura 4.4: Esquema configuració dels tres anells musculars i els tres punts d'aplicació en cada anell. Imatge modificada a partir de la figura original 3.25 .

El nivell de pH dependrà del tipus d'aliment ingerit ja que el pH en consum de productes alts en proteïnes serà més baix que en aquells més rics en fibra [50].

De manera semblant al DGM [36], es realitzarà un mostreig sistemàtic del pH present en el líquid gàstric, i s'anirà corregint a fi que estigui en el rang especificat. D'aquesta manera, treballarem amb un control per llaç tancat.

Per corregir l'alcalinitat dels aliments i controlar el pH, s'injectarà una solució àcida al líquid gàstric, amb la composició abans exposada (veure taula 3.1) i seguint les recomanacions de INFOGEST 2.0 [16]. Tal i com succeeix a l'estómac humà, la secreció d'aquesta solució no es produeix en un punt concret, sinó contínuament per tota la superfície de les parets estomacals. Aleshores, s'utilitzarà un mecanisme de secreció que permeti injectar la solució secretora en diferents alçades de manera simultània. El mètode proposat és l'ús d'un tub foradat en diferents punts i que estarà situat a l'eix central del cos estomacal, permetent repartir radialment i a diferent altura la solució gàstrica.

S'ha de fer menció que, degut a limitacions tecnològiques dels mesuradors de pH, s'ha de realitzar una calibració, ja sigui d'un o tres punts, cada cop que s'empra l'equip. Per altra part, la secreció gàstrica vindrà d'un recipient en el qual s'haurà preparat àcid clorhídric amb pepsines i mucoses, assemblant-se al líquid que es secreta a l'estómac. Finalment, indicar que la secreció gàstrica és un procés gairebé constant i que el control es fa regulant el caudal de secreció.

## **4.6. Regulació tèrmica**

En els humans la temperatura de l'estómac oscil·la entre els 36,5°C i els 37,5°C. Aleshores, el simulador ha de ser capaç d'obtenir i regular la temperatura en aquest rang. Al tractar-se també d'un control amb llaç tancat, necessitarem obtenir la temperatura interior de l'estómac. Per això es farà ús d'un termoparell submergit en el líquid gàstric. Es valorarà la temperatura de dos punts diferents i segons calgui es procedirà a encaletir l'aliment.

Per a encaletir el simulador, seguint el precedent de la UC Davis, s'utilitzarà una bombeta de infrarojos. A més, per si fos necessari, es prepararà l'equip també per encaletir el sistema amb un radiador.





## FRAMEWORK

Com s'ha parlat en capítols anteriors, el principal objectiu d'aquest projecte és proposar un digestor in vitro capaç de replicar el comportament peristàltic i secretor gàstric en humans. Aleshores, es tracta d'un disseny en el que es prioritzarà la simulació dels processos en la digestió, i no sols l'obtenció dels resultats d'aquesta.

Per gestionar aquest sistema serà precís l'ús de sensors i actuadors, a fi de realitzar un control per llaç tancat en tot el procés. A més, donat que és tracta d'un equip amb finalitat de recerca, s'emmagatzemaran les dades de l'equip constantment durant tot el procés de digestió.

Dividirem aquest capítol en tres seccions principals: mecanització i estructura, sistemes de sensors i actuadors, i sistemes de control. Finalment, procedirem a la selecció de components i el resultat final una vegada tinguem tots els equips ensamblats.

### 5.1. Mecanització i estructura

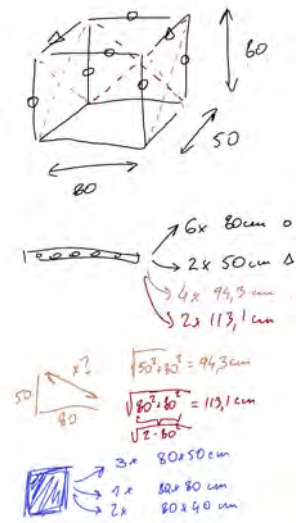
El prototip desenvolupat consta pel que fa a la part mecànica d'un sistema de subjecció, d'un receptacle que simula l'estómac i finalment d'un sistema elèctric de protecció i seguretat en baixa tensió.

#### 5.1.1. Bastidor i suports

Pel que fa al bastidor, aquest es tracta d'una estructura metàl·lica en forma de ortoedre, amb una base de 80 cm per 50 cm, i una alçada de 80 cm (fig. 5.1b). Com es pot veure a la figura 5.1a, l'estructura està feta amb angles ranurats (2,5 cm de distància entre eixos) d'acer galvanitzat, emulant el muntatge d'una estanteria industrial. A més, també s'observa com la base està feta per una sola peça d'acer galvanitzat, a fi de conferir major resistència front la torsió transversal i permetre'n l'ús com a base i suport practicable simplificant-ne la seva neteja. Per conferir major resistència front a la tallant i rigiditzar el bastidor, s'utilitza en tres dels laterals traves diagonals. La coberta està formada per tres bigues de 80 centímetres.



(a) Vista frontal del bastidor durant el muntatge.



(b) Esquemes de suport durant fabricació.

Figura 5.1: Imatges del procés de muntatge del bastidor.

Noti's que aquesta estructura serveix no sols per conferir rigidesa a tot el model, sinó que s'utilitzarà com a fixació de part del cablejat i sistema hidràulic. Sobre la biga central trobam un angle ranurat vertical al lateral esquerra (veure figura 5.2) que serveix com a suport del recipient estomacal. El recipient és subjectat amb un suport de canonada agrícola que va ancorada en aquest angle. Per altre part, a la part central d'aquesta biga hi trobam un altre angle ranurat vertical, suport d'alguns dels actuadors lineals que s'utilitzaran per simular el peristaltisme. En aquesta mateixa biga, trobam un altre suport de canonada que s'utilitzarà per situar-hi el vas amb el líquid gàstric (principalment HCl).

Per altra banda, a fi de confinar l'aire calent dins l'estructura, el bastidor està envoltat de policarbonat transparent subjectat per Velcro. Aquest sistema permetrà també que en cas d'haver esquitxos (recordem que hi haurà àcid clorhídric circulant) la pantalla protegeixi als usuaris o altres persones pròximes a la màquina. El sistema de subjecció permet que sigui senzill muntar i desmuntar els panells, a fi d'accedir a l'interior de la màquina de manera simple per netejar i fer postes en marxa. El panell superior compta amb uns agafadors, ja que s'espera que sigui la zona que més s'utilitzarà per accedir a l'interior de la màquina.

### 5.1.2. Contenidor gàstric

El contenidor gàstric que s'emprarà és el mateix que el de la UC Davis. Com vam veure, es tracta d'una màniga de làtex modificada segons les instruccions de la figura 4.2.

El contenidor estarà subjecte mitjançant una subjecció per canonades hidràuliques, tal i com es pot veure al detall de la figura 5.3. El procés de subjecció és el que s'enumera a continuació:

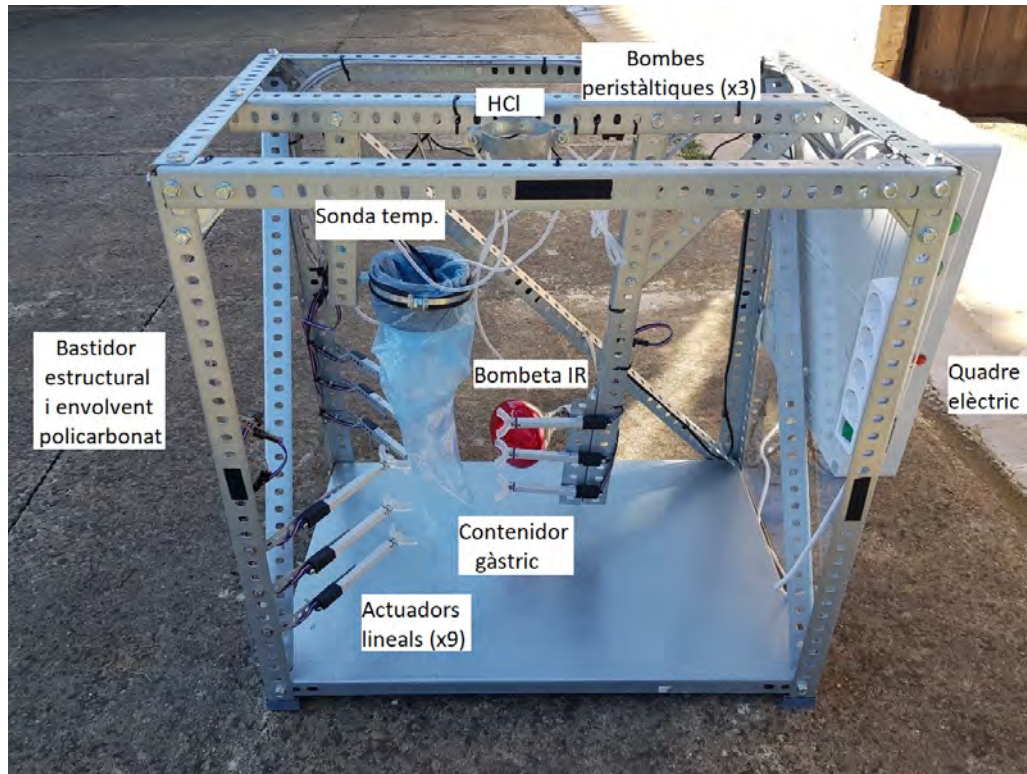


Figura 5.2: Vista frontal de simulador gàstric totalment muntat i preparat per a ser utilitzat.

1. Introducció contenidor gàstric dins anell tubular.
2. Plegament làtex a fi de recobrir la superfície de l'anell.
3. Introducció de l'anell amb el làtex dins el suport anular.
4. Tapar contenidor amb tapa enroscada (opcional, segons ús).
5. Introducció de tubs i sondes dins el recipient.

El resultat final del muntatge és el que s'observa a la figura 5.4. Aquest sistema de muntatge permet subjectar de manera senzilla l'estómac gràcies a l'ús d'una unió de canonada de PVC amb un lateral amb un espessor de major diàmetre, cosa que permet encaixar-ho a la subjecció. Per altra banda, per desmuntar, tan sols s'haurà d'estirar aquest tros de tub cap a dalt (el diàmetre és inferior al de la subjecció en aquest costat).

### 5.1.3. Protecció elèctrica

Com que l'equip serà manipulat per operaris, s'ha considerat adient desenvolupar un quadre elèctric bàsic, permetent la fàcil instal·lació elèctrica i protegint els usuaris de contactes directes i indirectes.

La principal restricció d'aquesta màquina és la combinació de circuits en corrent contínua (entre 3.3V i 12V DC) i circuits de corrent alterna (230V AC) a l'interior de la





Figura 5.3: Detall del sistema de subjecció de la cavitat gàstrica.

mateixa (la bombeta d'infrarojos funciona en alterna, mentre que la resta del circuits funcionen en contínua). Això sumat a l'existència de líquid dins el dispositiu (aigua i HCl) fa que sigui molt important evitar problemes d'electrocució de l'operador o persones pròximes a l'equip. Es considera que l'equip estarà connectat a un circuit de l'edifici mitjançant una toma Schuko i degudament protegit segons les indicacions del Reglament de Baixa Tensió [51]. A fi d'evitar problemes aigües amunt, s'utilitzarà un mecanisme d'engedada i un dispositiu de protecció diferencial de 30mA de tipus AC.

Per situar tots els elements elèctrics s'ha decidit emprar un quadre elèctric en superfície, veure figura 5.5. Seguint les recomanacions del fabricant Schneider Electric, l'alimentació es fa pel lateral inferior dret, seguit de la protecció diferencial. Això permet que en cas de derivació, tot el quadre quedi sense alimentació, reduint el risc elèctric. A continuació, l'alimentació anirà de la protecció diferencial a un interruptor d'engedada connectat amb un indicador lluminós, situat al lateral esquerre. D'allà s'alimentarà una regleta, a la que es connectarà la font d'alimentació (amb sortida de 0-5V i 0-12V DC), el dispositiu d'escalfament (bombeta infraroja) i una regleta d'endolls, preparada per po-

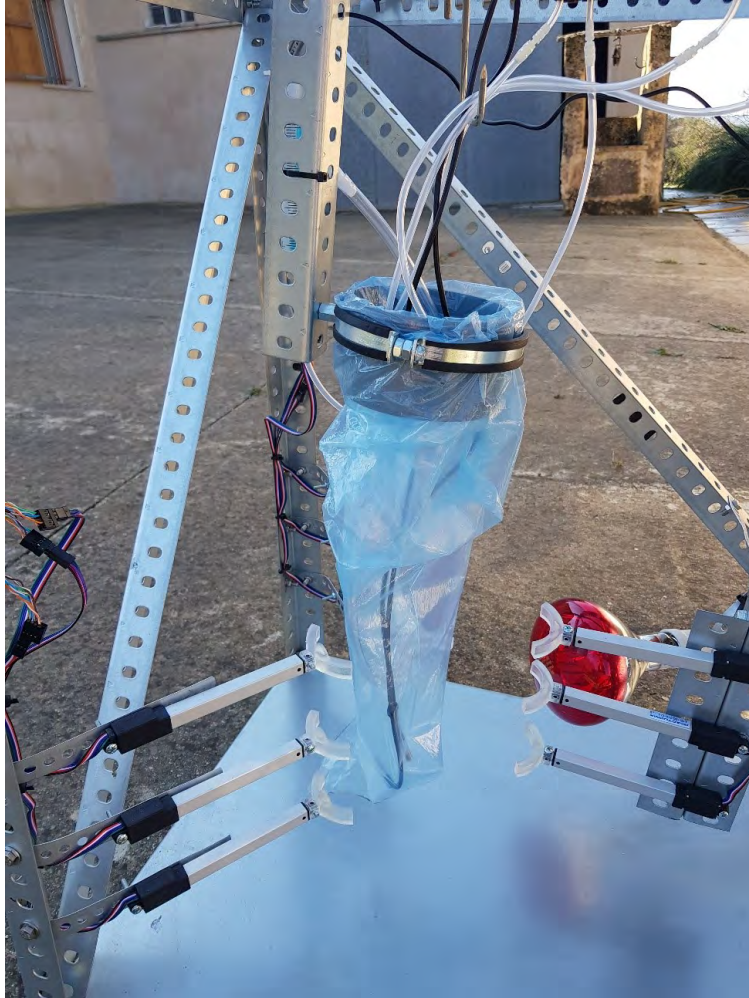


Figura 5.4: Resultat final del muntatge del contenidor gàstric.

der connectar un ordinador o altres equips que puguin ser necessaris per l'operativitat de la màquina. A l'annex C s'aporta l'esquema unifilar del circuit elèctric.

A la figura 5.6 podem observar un detall del lateral esquerre del quadre, on s'hi observa de dalt a baix: botó de funció 1, botó de funció 2 (utilitzats com a botons de control, veure capítol 6) i interruptor d'encesa/apagat amb un pilot lluminós que n'indica l'estat.

Noti's que el controlador i tot el cablejat necessari està situat dins el mateix quadre. Aquesta decisió d'implementació està emmarcada per raons pràctiques: es pot fer la posada en marxa i manteniment de gairebé tots els equips (especialment a nivell de cablejat) dins el mateix quadre, simplificant els punts d'accés i permet que dins el bastidor metàl·lic es redueixi el nombre de components, reduint els riscos derivats i incrementant el nivell estètic de l'equip. Fixar-se també en l'eliminació del recobriment del cable estructurat, cosa que permet més flexibilitat als cables i s'eliminen esforços i tensions innecessàries dins el quadre. Tot aquest cablejat anirà cap a dins del bastidor a través d'una finestra situada a la part superior del quadre, funcionant també com a punt de sortida del calor provinent dels sistemes elèctrics.



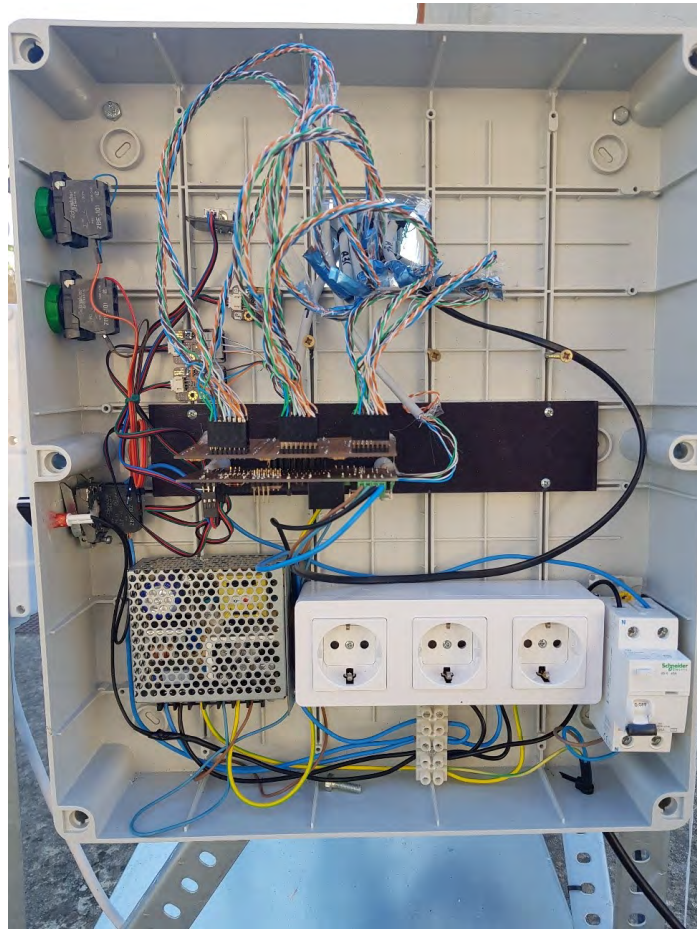


Figura 5.5: Detall del quadre elèctric de protecció i control dissenyat.

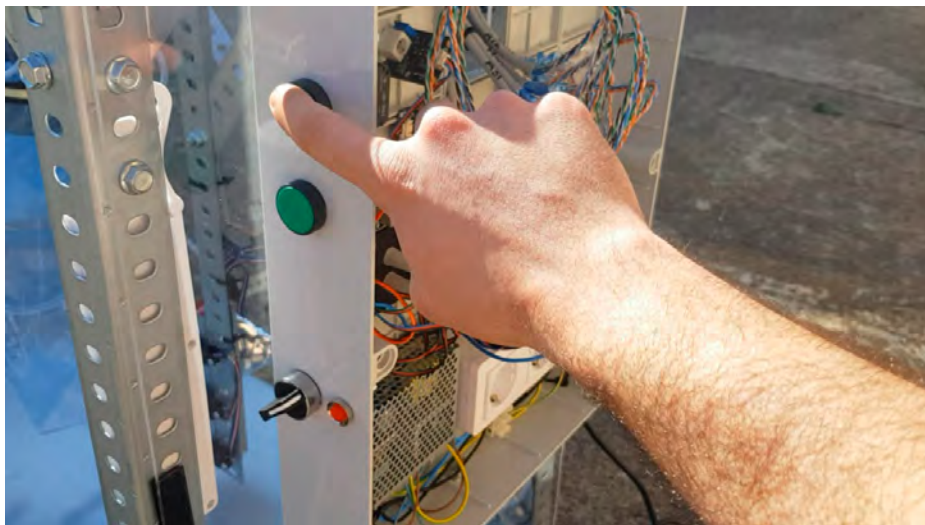


Figura 5.6: Lateral esquerra de l'envolvent amb els botons de funció.

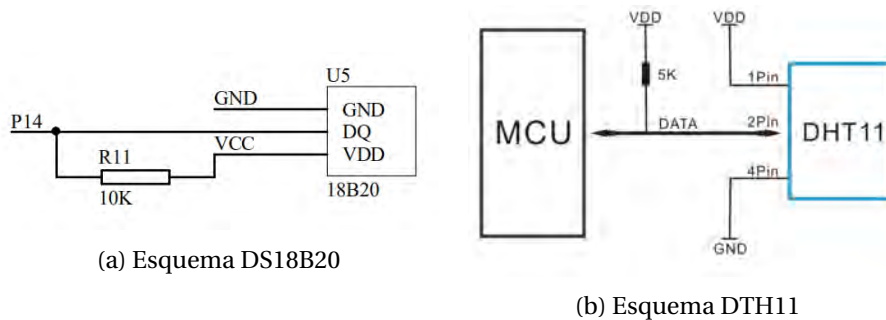


Figura 5.7: Esquemes de resistències de *pull-up*.

Finalment, comentar que el quadre serveix com a suport dels connectors necessaris per les sondes de temperatura i la sonda de pH, i per motius de seguretat, s'ha introduït dins el quadre un sensor de temperatura i humitat que servirà per mesurar la temperatura ambient abans de començar el procés de digestió i com a alarma de risc per sobreescalfament durant l'operació.

## 5.2. Sensors i actuadors

Bàsicament, el digestor ha de realitzar el control de tres paràmetres diferents: temperatura, pH i moviment peristàltic. En aquest apartat analitzarem les solucions proposades, a nivell de sensorica i actuadors. També s'estudiarà el procés per la recaptació de mostres per ser estudiades amb altres equips.

### 5.2.1. Control de la temperatura

Com s'ha explicat anteriorment, la temperatura ha d'oscil·lar entre els 36,5°C i els 37,5°C. Per realitzar el control amb llaç tancat s'utilitzaran dos sensors de temperatura dins el contenidor gàstric, alineats sobre l'eix vertical i disposats a la zona inferior i superior, respectivament. D'aquesta manera, podrem calcular la temperatura mitjana del contingut gàstric. Aleshores, necessitarem una sonda impermeable i amb un error no superior a  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Per a tal fi s'han elegit dos sensors del tipus DS18B20 [52] (figura 5.8), que permet connectar ambdós sensors al mateix bus de comunicació, a través del protocol 1-Wire amb la curva d'error que s'observa a les figures 5.9 i 5.10. Noti's que aquests sensors requereixen d'una resistència de pull-up (veure figura 5.7). Per obtenir les dades del sensor, s'accedirà a la ROM del DS18B20 mitjançant el bus 1-Wire. Aquest bus permet connectar varis dispositius esclaus en un mateix bus. El microcontrolador, que serà el mestre, farà peticions al registre específic de la ROM dels sensors. A fi de simplificar el procés, s'utilitzarà la llibreria OneWire [53].

Per altra banda, també s'ha considerat l'ús d'un sensor de temperatura a l'interior del quadre elèctric. La funció d'aquest sensor és múltiple: per una part, serveix com a alarma de sobreescalfament dels equips elèctric i, per altra banda, permetrà mesurar la temperatura ambient abans d'iniciar la digestió. El sensor seleccionat per aquesta finalitat és el DHT11 [54], ja que permet també mesurar la humitat ambient: paràmetre fins aleshores no analitzat durant la digestió però que podria tenir efecte en la reproducció del procés.



Figura 5.8: Sonda de temperatura DS18B20.

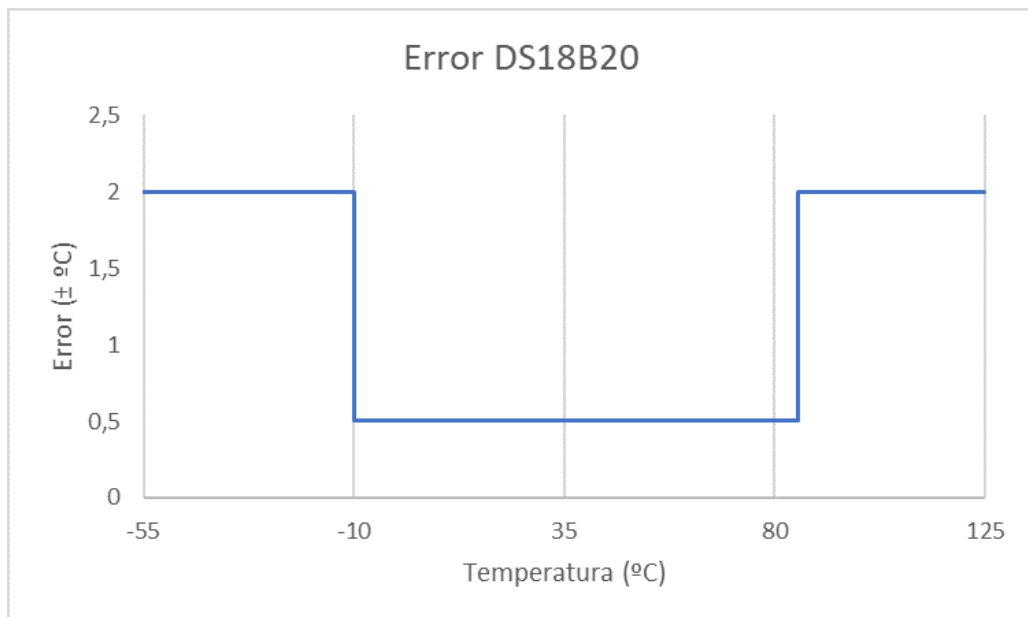


Figura 5.9: Evolució de l'error de lectura de la temperatura segons la temperatura real. Gràfic propi a partir de les dades del fabricant [52].



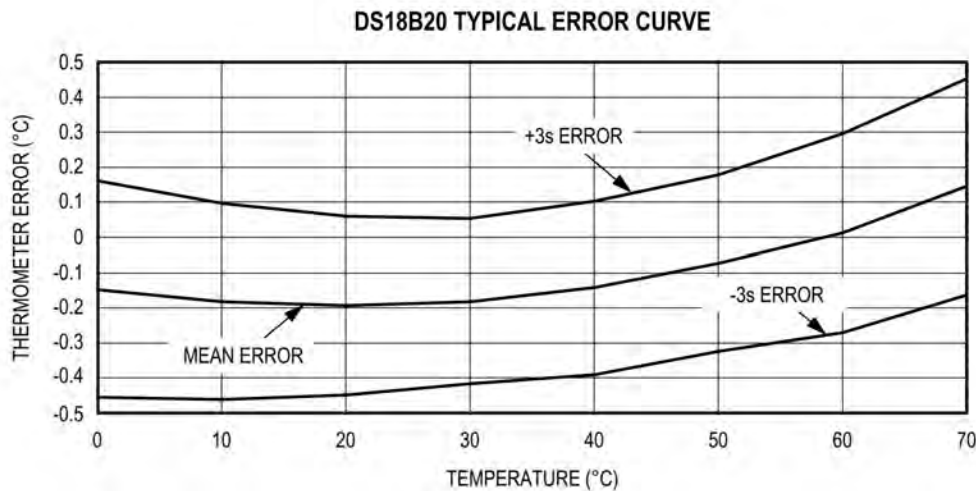


Figura 5.10: Evolució de l'error entre 0 i 70°C. Dades del fabricant [52].

Aquest sensor, que també requereix d'una resistència de *pull-up*, retorna una sortida digital de 40 bits. El primer grup de 16b correspon al valor de la humitat (els 8b primers corresponen a la part entera; mentre que els 8b darrers, a la part decimal), els següents 16b retornen el valor de la temperatura (seguint el mateix format exposat per la humitat), i els 8 bits finals són els bits de paritat. Aleshores, tan sols llegint el valor digital del sensor podem obtenir ambdues variables. L'error d'aquest dispositiu és de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  en el rang d'operació (0-50°C) i un 5% d'error en la mesura de la temperatura.

Pel que fa a l'actuació sobre la temperatura, seguint els passos de la UC Davis, s'utilitzarà una bombeta infraroja de 230W (1A, 230V AC) a fi d'encalenticar i mantenir la temperatura per sobre els 36,5°C. Per simplificar el control, aquesta es controlarà amb un relé. La bombeta es situarà a l'extrem inferior del bastidor a fi d'estar pròxim al contenidor i el més allunyat possible de la resta de cablejat (veure figura 5.11). A més, el cablejat de AC anirà per una ruta separada del cablejat en DC, a fi d'evitar interferències i problemes elèctrics. S'ha de tenir en compte que donat que es tracta d'una bombeta de 230W no es podrà utilitzar un connector de plàstic, i s'haurà d'utilitzar un connector ceràmic, tal i com es pot veure a la figura 5.12.

### 5.2.2. Control de l'acidesa

El control de l'acidesa es realitzarà també mitjançant un sistema de llaç tancat. En primer lloc es mesurarà el pH del contingut gàstric, i es secretarà àcid clorhídric segons sigui necessari a fi de mantenir el nivell dins els rangs especificats.

Per mesurar el nivell d'acidesa s'utilitzarà una sonda de pH SEN0161 [55]. Inicialment, es va pensar en situar-la dins el contenidor gàstric, no obstant per evitar problemes de trencament derivats de la pressió dels actuadors en replicar la peristalsi, es va decidir en darrera instància que el sensor ha d'estar separat del cos gàstric.

Aleshores, s'utilitzarà un sistema de propulsió hidràulica, mitjançant una bomba peristàtica [56] (veure figura 5.14). La bomba estarà en constant funcionament, i recollirà el líquid en el cos gàstric i el desplaçarà fins a arribar allà on està situada la sonda. A la figura 5.13 s'il·lustra el dispositiu de recollida de mostres on està situada

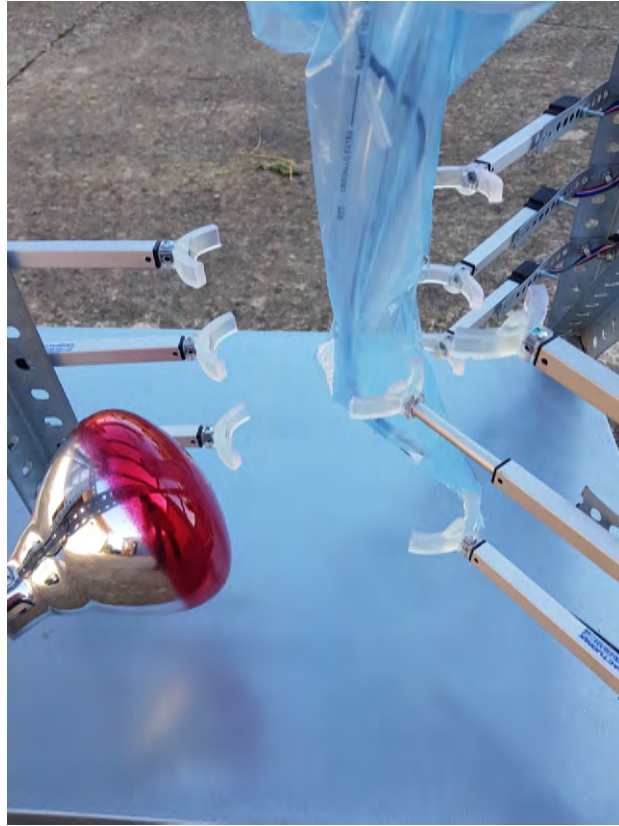


Figura 5.11: Situació de la bombeta en referència a la resta d'equips.

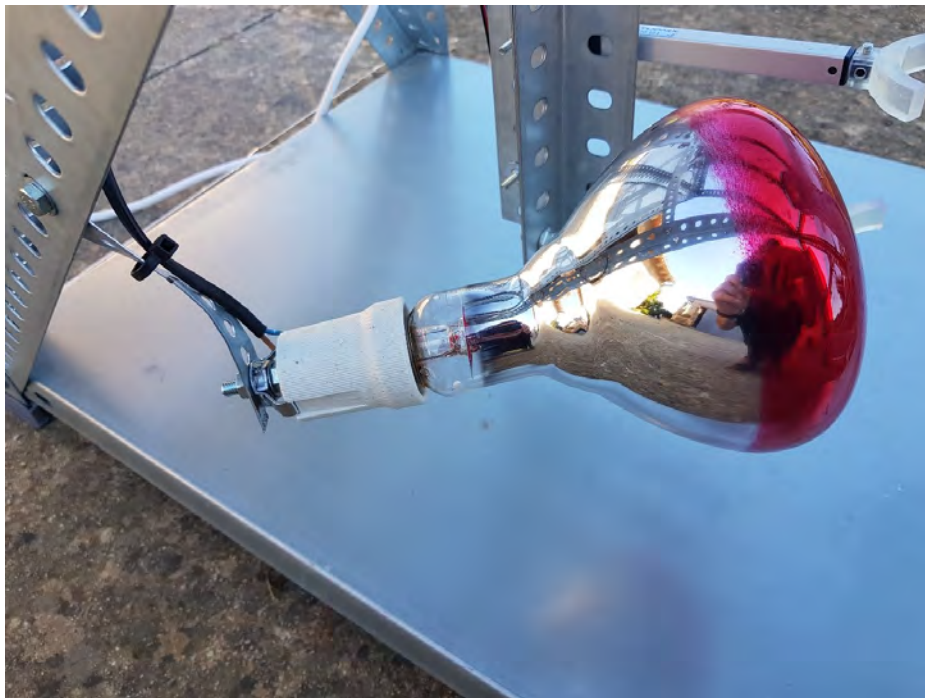


Figura 5.12: Detall del mecanisme d'anclatge de la bombeta i el connector ceràmic.



Figura 5.13: Dispositiu de mostreig de pH amb sortida per gravitació.

la sonda. Bàsicament, es tracta d'una xeringa alimentària modificada que permet l'entrada de líquid pel conducte inferior, i la sortida es realitzarà per vessament al conducte lateral, permetent retornar el líquid a la cavitat gàstrica. La sonda, com es pot observar, està situada dins l'interior de la xeringa. Aquest sistema permet que donat un caudal constant, es puguin realitzar mostres discretes del líquid, i que mitjançant la pressió a la zona inferior (entrada) es vagi renovant el contingut de la xeringa.

Per altra banda, per regular el nivell d'acidesa s'afegirà al contingut gàstric una solució d'àcid clorhídric, de manera anàloga al cos humà. Aleshores, s'anirà injectant la solució per evitar que l'aliment es torni bàsic. Per això s'utilitzarà una altra bomba peristàtica (igual que la utilitzada per fer el mostreig), que recollirà d'un recipient situat al subjecte vasos (veure figura 5.15) i l'enviarà fins al contenidor gàstric.



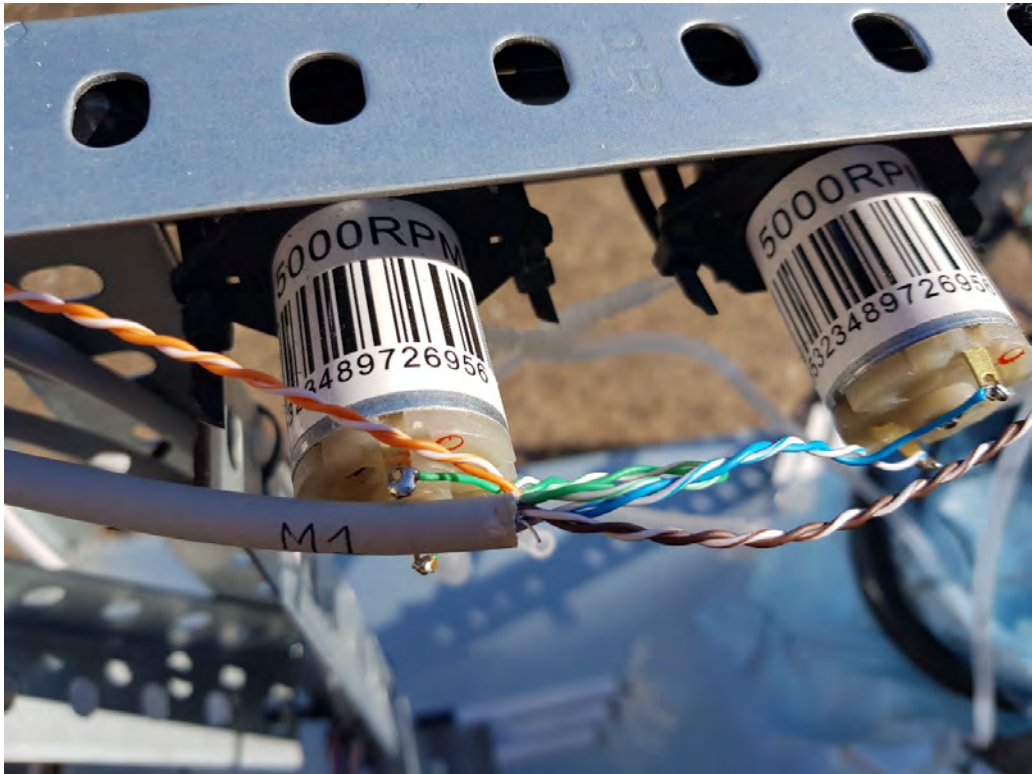


Figura 5.14: Detall de bombes peristàtiques i el cablejat comú a través de CAT5.

### 5.2.3. Reproducció del peristaltisme

#### Actuadors lineals

Anteriorment hem estudiat els diferents sistemes per dur a terme el moviment peristàltic (capítol 3), i hem decidit que el modelitzarem amb un sistema mecànic radial de tres anells (4). En cada anell, es disposaran tres actuadors lineals separats 120° entre ells. Es situarà un anell, o grup muscular, a la zona superior de l'estómac, a la mitjana i a la inferior.

Els equips emprats són els actuadors lineals de L12-100-210-12-I del fabricant Actuonix [57] i s'han adaptat amb el sistema d'enroscament que es pot veure a la figura 5.16.

Es tracta d'uns actuadors de carcassa d'alumini anoditzat amb controlador integrat que permeten designar una posició mitjançant control per tensió o corrent i retorna el valor de la posició en tot instant. Segons les dades del fabricant, aquest equip permet realitzar una força de fins 80N i té una velocitat màxima de 6,5mm/s, podent-se allargar fins a 152mm des de la posició inicial de recollida. A la figura 5.17 es pot observar la corba de potència segons velocitat (la referència seleccionada es la 210:1 – 12V).

El control de la posició dels actuadors es farà fixant un valor de consigna de tensió entre 0V i 5V, sent 0V la posició de retracció màxima i 5V l'allargament màxim. A més, aquests sensors poden actuar en llaç tancat, retornant el valor de la posició actual (pot diferir de la consigna) mitjançant el valor de la tensió entre 0V i 3.3V (0V indica estat de retracció màxima i 3.3V indica allargament màxim).

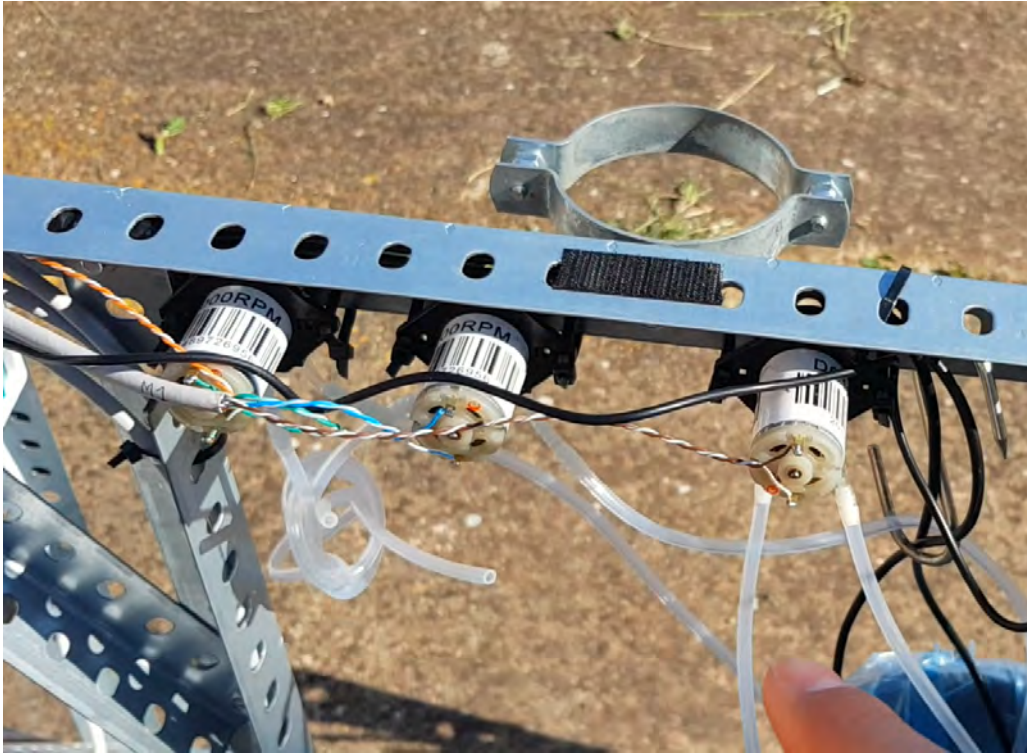


Figura 5.15: Situació de les tres bombes peristàtiques: bomba de mostreig líquid, bomba de recollida continua per mesura de pH, bomba de secreció de HCl, d'esquerra a dreta.

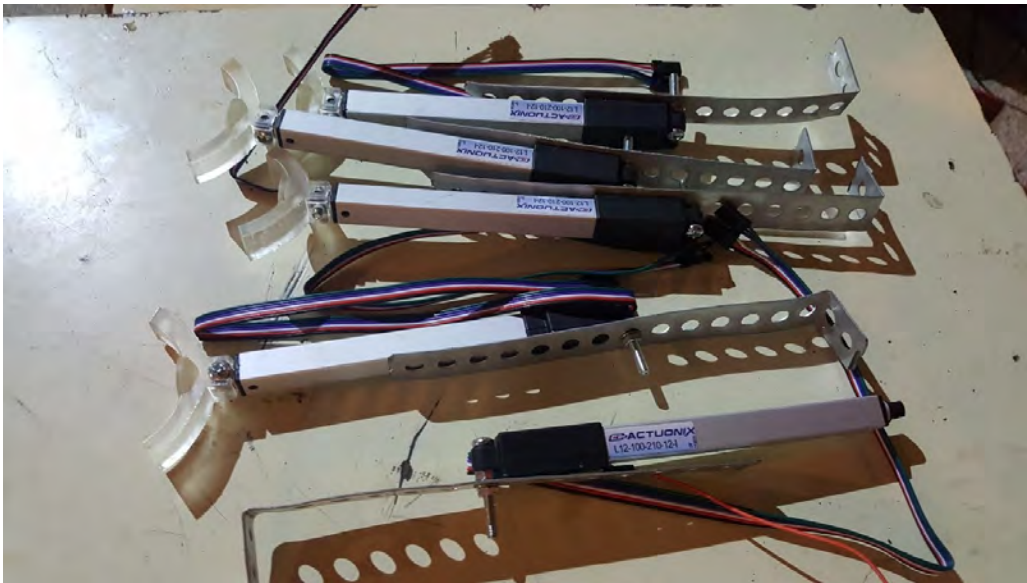


Figura 5.16: Actuadors amb sistema d'unió.

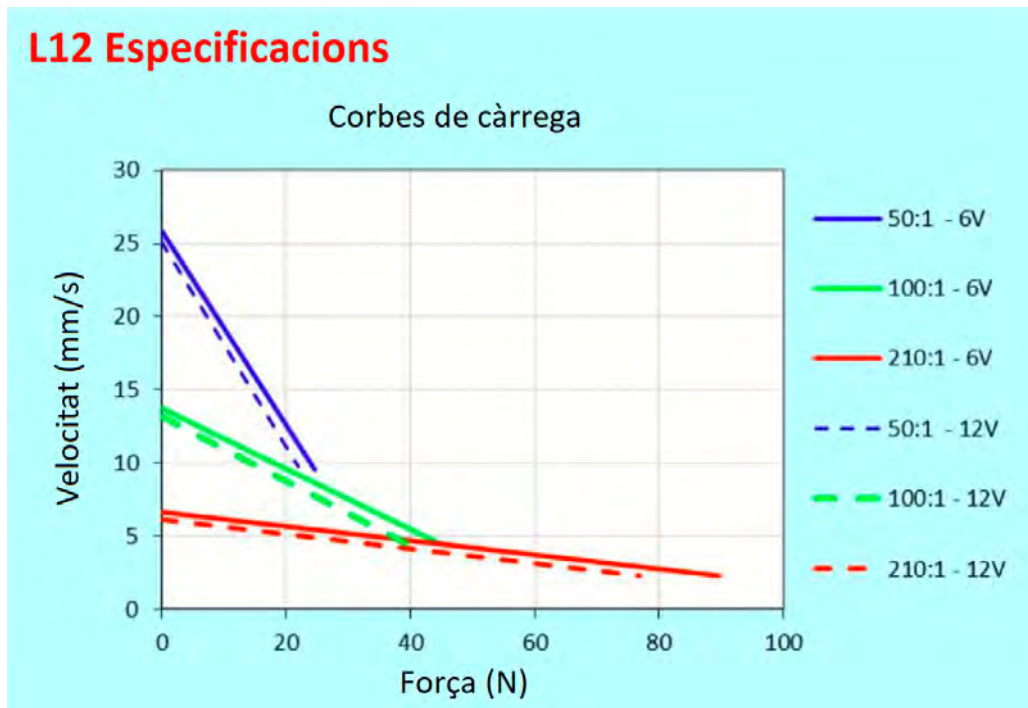


Figura 5.17: Corbes de potència segons velocitat. Font: fabricant [57].

### Terminació en forma de pinça

No obstant, necessitarem algun tipus de terminació a l'actuador a fi de que s'empeny la màxima superfície possible del contenidor gàstric. Donada la particularitat de la necessitat, no trobarem al mercat cap dispositiu adequat per a tal fi, per això s'haurà de dissenyar una peça a mida.

El procés de disseny de la peça s'ha realitzat amb Solidworks [58] atenent principalment als requisits de forma de la pinça i el mecanisme d'acoblament de l'actuador. Per una banda, interessa fabricar 9 peces iguals, amb forma d'arc circumferència amb un angle de 180°, optimitzant la superfície de contacte del grup muscular. Per altra banda, hi prepararem una zona per col·locar-hi en un futur una cèl·lula de càrrega MF01 [59] que permeti estudiar l'impacte de la força sobre el peristaltisme. Com a detall, noti's que s'ha preferit esmorteir els cantons de la peça, a fi d'evitar angles que puguin fer malbé la bossa gàstrica en pressionar-hi. El resultat del disseny és el que es pot veure a les figures 5.18 i 5.19

Així doncs, una cop el disseny de la peça estava realitzat, es va procedir a la fabricació d'aquesta mitjançant una impressora 3D d'estereolitografia SLA [60], facilitada pels companys de Química Analítica de la UIB, que permet assolir resolucions de 25 micres. Aquest sistema d'impressió permet fabricar peces altament resistents, i donat que s'utilitza resina fotosensible permet imprimir cavitats que amb una impressora 3D de filament seria inviable.

El resultat final és el que s'observa a la figura 5.20 i la figura 5.21. A més, a l'annex A s'han aportat els plànols, també al dossier de documentació addicional s'hi troben els fitxers de disseny.

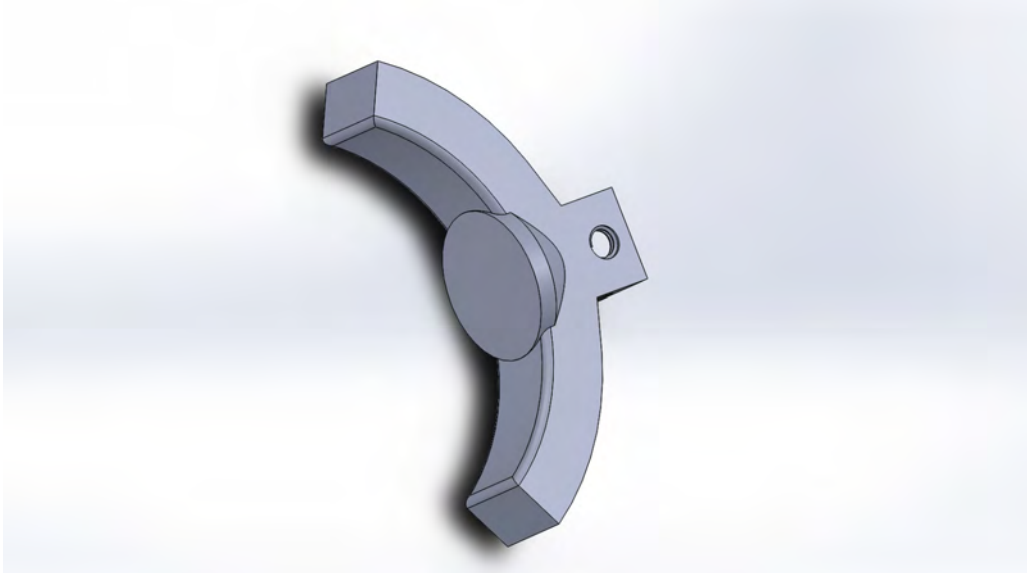


Figura 5.18: Vista A del Model CAD de la pinça.

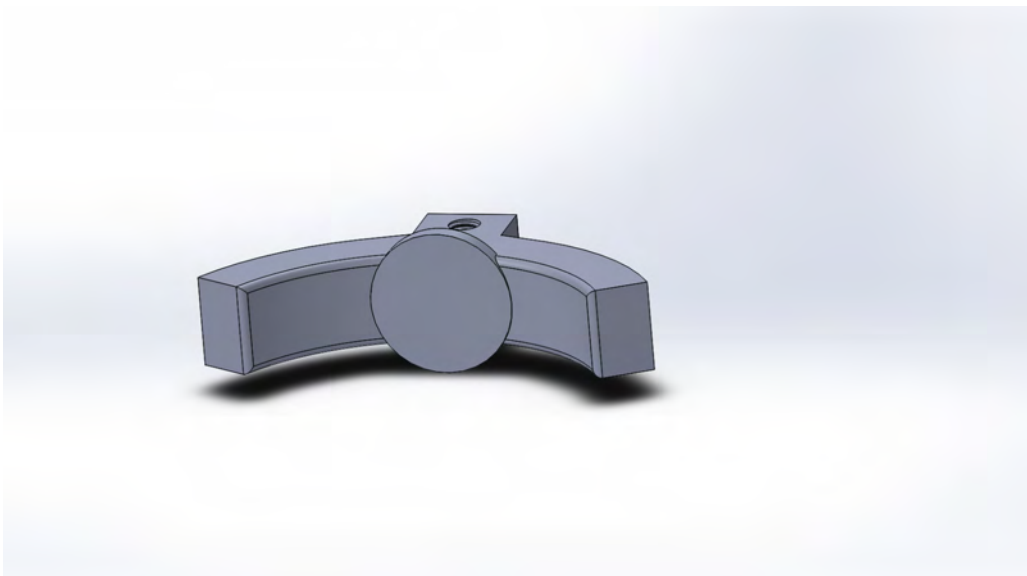


Figura 5.19: Vista B del Model CAD de la pinça.





Figura 5.20: Vista posterior-lateral de la pinça fabricada.

### 5.2.4. Sistema de recollida de mostres

Com a consideració final, un dels requeriments d'aquest prototip és el mostreig de líquid i sòlid de manera periòdica, per poder ser utilitzat amb altres estris i aparells i poder-ne estudiar l'evolució del contingut gàstric durant tot el procés de digestió.

Pel que fa a la recollida de mostres líquides, s'utilitzarà una bomba peristàltica igual a les abans proposades (en total, el sistema disposa de tres bombes idèntiques però que s'utilitzen per diferents funcions). D'aquesta manera, quan l'operari ho indiqui, la bomba s'encendrà i recollirà el contingut líquid del contenidor gàstric i el depositarà en el vas de l'operari.

En el cas de la recollida de mostres sòlides, per simplificar el sistema i evitar problemes de col·lisió, quan l'operari ho indiqui el sistema de peristaltisme s'aturarà, recollint els actuadors a la posició inicial. En aquest moment, l'operari podrà obtenir manualment la mostra sòlida que es desitgi. Un cop la mostra s'hagi pres i l'operari ja no es trobi dins el bastidor, l'operari haurà d'indicar al digestor la reanudació del procés, i





Figura 5.21: Vista anterior-lateral de la pinça fabricada.

aquest tornarà al lloc que s'havia deixat.

Veurem en el pròxim capítol com l'operador designarà les consignes a la màquina, però adelantam que es tracta d'un sistema basat en pulsació dels botons exteriors del digestor.

### 5.3. Sistema de control

El Simulador Gàstric Humà no sols compta amb un sistema de subjecció mecànic, ni amb un variat conjunt d'actuadors i sensors, també necessita un sistema de control que permeti assignar les accions a desenvolupar segons sigui l'estat del sistema en aquell instant i la seva evolució fins llavors. Per això necessitarem un dispositiu de control, a més d'un sistema d'emmagatzematge de dades, les diverses plaques impreses i un sistema de comunicacions i cablejat robust.

### 5.3.1. Dispositiu de control

El controlador és aquell dispositiu que gestiona les dades rebudes pels sensors i les transforma a senyals comprensives per l'usuari. Llavors, emmagatzema aquesta informació i defineix un valor de control als actuadors. Per dur a terme aquesta tasca trobam diferents plataformes, entre les quals destacam:

#### PLC

Els PLC són els equips més emprats en l'àmbit industrial. Estan dissenyats per controlar processos seqüencials i utilitzen programes lògics que l'usuari haurà de programar. Estan dissenyats per suportar entorns físicament desfavorables (vibració, pols, renou elèctric...), i el seu cost varia àmpliament segons els seus usos [61].

Tot i que el PLC són dispositius ideals per a la tasca que volem desenvolupar, el cost derivat del seu ús (tipus de sensors i actuadors, equips de xarxa necessaris, etc.) fa que sigui poc competitiu en un prototip que no se n'espera rendibilitat econòmica. Es considera doncs, la millor opció en cas de fabricar varis digestors, però el descartem com a controlador principal del prototip.

#### Raspberry Pi - microPC

Les Raspberry Pi (i altres microPC semblants, com l'Orange Pi [62] i l'Intel NUC [63]) són petits ordinadors low-cost amb els ports més habituals: USB, ethernet, HDMI, àudio, MicroSD slot i capçalera GPIO [64]. El principal avantatge d'aquests dispositius és la potència computacional i la seva expandibilitat. A més, el suport de la seva comunitat es notori, i molts de projectes desenvolupats són open source. El temps d'arrencada és molt reduït, i el consum energètic és relativament baix (400-500 mA, 2,5W aproximadament [65]).

Tot i que podríem desenvolupar el projecte amb una Raspberry, aquestes estan pensades més per processament de dades i no tant com a control d'actuadors i sensors.

#### FPGA

Una matriu de portes lògiques programable de camp (FPGA) es un circuit integrat per ser configurat per un client. Tot i ser molt populars a la indústria electrònica degut al seu alt rendiment, la dificultat per programar-les les fa poc adequades en projectes en les que l'adaptabilitat és un factor clau [66].

Tot i que en el nostre cas, haurem de desenvolupar una placa amb circuit integrat, consideram més adient l'ús de dispositius més apropiats per al testeig i que puguin ser fàcilment configurats i modificats.

#### Arduino

Segons Massimo Banzi, co-fundador de la plataforma Arduino i autor de Getting Started with Arduino [67], Arduino es una plataforma física de computació open source sobre una simple placa d'input/output (I/O) i un entorn de desenvolupament. Les plaques Arduino són micro-controladors, als quals se'ls hi poden afegir mòduls externs depenent del projecte. El reduït preu i el fet que es tracta de hardware open source fa que siguin plaques molt competitives en el mercat. Tot i no ser dispositius molt potents

(en comparació a les Raspberry Pi), les plaques Arduino són molt fiables i especialment adequades per obtenir informació de sensors i enviar consignes a actuadors [68]. El consum energètic és molt reduït i durant el funcionament el consum de la placa és proper als 20 mA.

Adicionalment, al mercat trobam diferents plaques Arduino adaptades a les diferents necessitats del projecte (WiFi incorporat, nombre de I/O, mida, Bluetooth, etc.) seguint la filosofia DIY.

Finalment, l'avantatge més important en la nostra aplicació és que són sistemes de control en temps real.

#### Teensy

Seguint amb la filosofia d'Arduino, trobam plaques d'altres fabricants que ofereixen diferents funcionalitats. Entre elles destaca la placa Teensy, en especial el model Teensy 3.6 (veure figura 5.22a i figura 5.22b). És una placa desenvolupada per Paul Stoffregen i PJRC que porta una plataforma ARM de 32 bits, utilitzant una versió adaptada de l'IDE d'Arduino.

Els principals avantatges d'aquesta placa respecte un Arduino habitual són [69]:

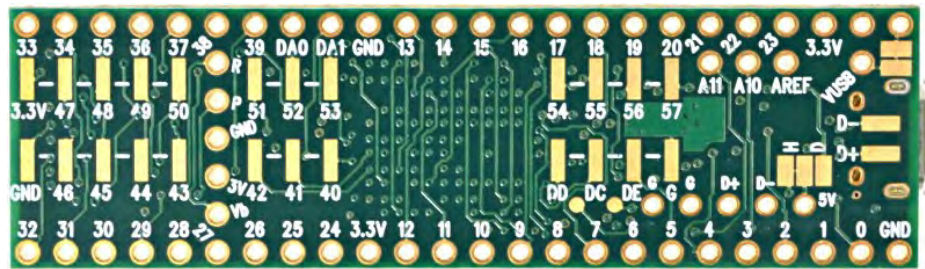
- 1024 Flash, 256K RAM i 4K EEPROM
- 2 busos CAN
- 22 sortides PWM
- 4 ports I2C
- 64 pins digitals de I/O
- 25 entrades analògiques
- 2 sortides analògiques
- Mac Ethernet
- Port d'entrada MicroSD
- 14 temporitzadors de hardware
- 3 ports SPI
- 6 ports sèrie
- Relotge en temps real

Aquesta placa té tots els avantatges de les plaques Arduino més les ja esmentades. Això permet que un sol dispositiu (sense la necessitat de mòduls externs) pugui controlar tot el digestor i en cas de necessitar altres sensors poder ampliar fàcilment, evitant haver de canviar de dispositiu.

Per totes aquestes raons, la Teensy 3.6 és el dispositiu seleccionat com a controlador principal del simulador gàstric humà.



(a) Vista superior del Teensy 3.6 [69].



(b) Vista inferior del Teensy 3.6 [69].

Figura 5.22: Anvers i revers del controlador Teensy 3.6 [69]

### 5.3.2. Logger: registre de dades

La capacitat d'emmagatzemar les dades recollides pel controlador és molt útil per dur a terme un anàlisi de funcionament del digester i el seu anàlisi de fallada, a l'hora que permet també emmagatzemar dades de l'evolució del procés de digestió: evolució de la temperatura, evolució de l'acidesa i estat del peristaltisme, a més que permet entrellaçar aquestes tres variables.

El data logger hauria d'emmagatzemar aquesta informació, però també la temperatura ambiental inicial i una marca temporal de cada una de les mostres. Per això darrer, és imprescindible un rellotge en temps real.

S'ha decidit que el registre de dades es farà en una MicroSD, que serà fàcilment extraïble i còmode per importar la informació a un PC per analitzar la informació. La Teeny 3.6 ja compta amb un port MicroSD i un rellotge en temps reals (motius de pes en seleccionar-la com a placa, a fi d'evitar mòduls externs), i s'hi acomplirà una pila CR232 de 3V per mantenir la data i l'hora, tot i que desconnectem el digester de l'alimentació de xarxa.

### 5.3.3. Plaques i equips auxiliars

El sistema de control i tots els sensors aniran connectats a una placa de circuit imprès, eliminant cablejant i conferint als components d'un sistema un suport mecànic fixe i no provisional.

En primer lloc, tots els circuit van ser testejats en una protoboard, i una vegada verificat el correcte funcionament del sistema es va procedir a dissenyar una PCB amb el software EagleCAD. Després de fabricar diversos prototips a la impressora del laboratori d'electrònica de la UIB, i l'ajuda del tècnic Mateu Fernández tant en la fabricació com assessorament, es va decidir separar el sistema en dues plaques: per un lloc la placa

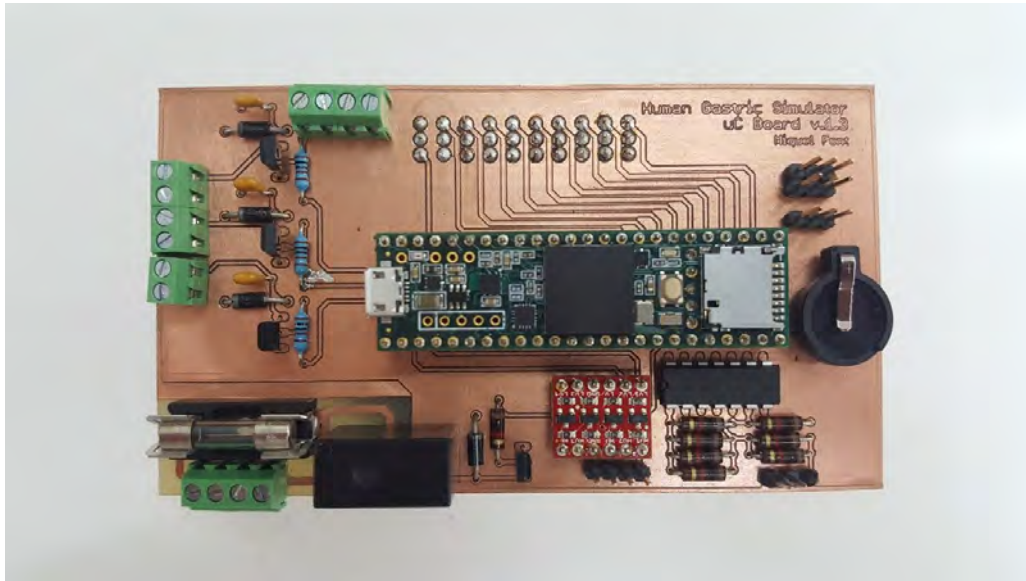


Figura 5.23: Anvers de la uC Board v.1.3.

de control (uC Board v.1.3) i la placa d'interface dels actuadors lineals (Actuator Driver v.1.1). Noti's que ambdós esquemes elèctrics estan adjunts a l'annex B.

### uC Board v.1.3

El centre sobre el qual pilota la placa de control és el controlador Teensy. Com es pot veure a la figura 5.23 i la figura 5.24, anvers i revers de la placa respectivament, el controlador està situat al centre de la placa.

A l'indret superior hi trobam els pins d'acoblament del driver dels actuadors, que es connectarà seguint l'estil dels shields utilitzats en els Arduino. A l'esquerra hi trobam en primer lloc els connector d'alimentació, i a sota els connectors atornillats de les bombes peristàltiques, amb un circuit de control per transistors.

A la zona inferior esquerra hi trobam el circuit de control de corrent alterna. Bàsicament es tracta d'un relé protegit amb un fusible i augmentant les distàncies entre pistes per evitar un curt-circuit per pont dielèctric.

A continuació trobam un circuit de transformació de voltatge amb un *level shifter*. D'aquesta manera, podrem comunicar el Teensy amb un sistema extern mitjançant comunicació SPI, independentment de la tensió d'alimentació d'aquest altre sistema. Així doncs, queda palesa la capacitat per ampliar el sistema en un futur, conferint de robustesa al sistema. Seguidament hi trobam el circuit d'amplificació del pH-metre així com els punts de connexió.

Finalment, al lateral dret hi trobam, de sobre a sota, els dos connectors de les sondes de temperatura (connectades al mateix pin del controlador, compartint bus 1-Wire), el sensor de temperatura i humitat del quadre elèctric i finalment el suport per la pila CR232.



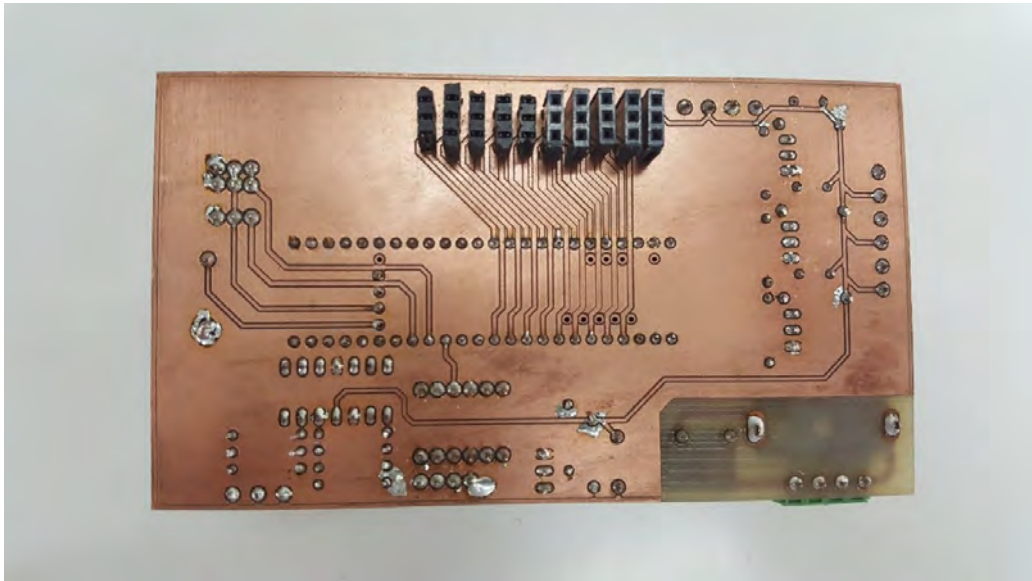


Figura 5.24: Revers de la uC Board v.1.3.

### Actuator Driver v.1.1

Com s'ha observat a la placa de control, aquesta anirà acoblada a la placa d'interface dels actuadors mitjançant un seguit de connectors femella a la part inferior de la primera. Aleshores, el driver dels actuadors porta, tal i com es pot veure a la figura 5.25 i la figura 5.26, els mateixos connectors mascles.

Bàsicament, aquesta placa és un circuit d'amplificació de 9 vies, una per cada actuator lineal, transformant la senyal de control de 3.3V a la senyal dels actuadors de 5V. Recordar que el control dels actuadors es farà indicant la posició mitjançant tensió entre 0V i 5V, sent 0V la posició de retracció i 5V allargament màxim.

Noti's que a efectes de simplificar la depuració, el connector de la placa està agrupat en files segons l'actuator, i cada tres formen un grup muscular, el mateix que s'observa a la zona de connexió inferior: cada tira de pins forma part d'un actuator, i aquesta està a una graella de 3 per 3 a la que es pot situar segons grup muscular i emplaçament.

### 5.3.4. Informació addicional

Com ja s'ha avançat en parlar del quadre elèctric, el sistema d'interacció de l'operari es basa en pitjar els polsadors exteriors (connectats directament a la uC Board v.1.3). No obstant, s'entén que més endavant es preferís utilitzar algun altre tipus de sistema o que hi hagués un sistema de HMI a través del qual l'operari pogués veure informació del funcionament. Per aquest motiu s'ha preparat el logic shifter abans mencionat, ja que tan sols s'hauria de connectar una altra placa Arduino amb una pantalla LCD (per exemple) i adaptar lleugerament el codi a fi de tenir una HMI més avançada. El mateix si es vol utilitzar un ESP32 per tenir una instància web i actualitzar un servidor mitjançant una connexió WiFi.

Per altra banda, destacar novament que tot el sistema de cablejat, independentment del tipus de comunicació, es farà amb cable estructurat CAT5. Això té diferents raons.

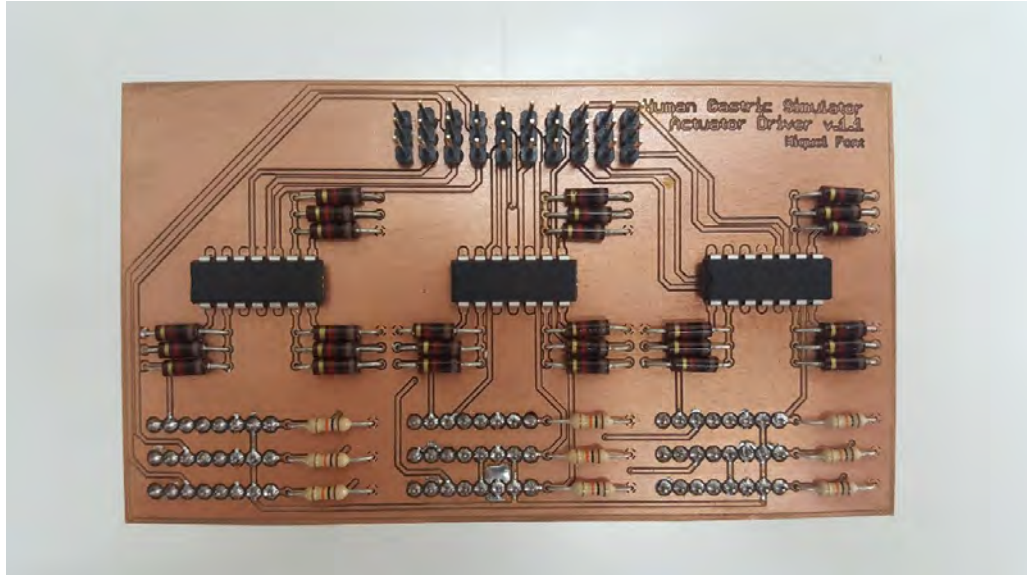


Figura 5.25: Anvers de l'Actuator Driver v.1.1.

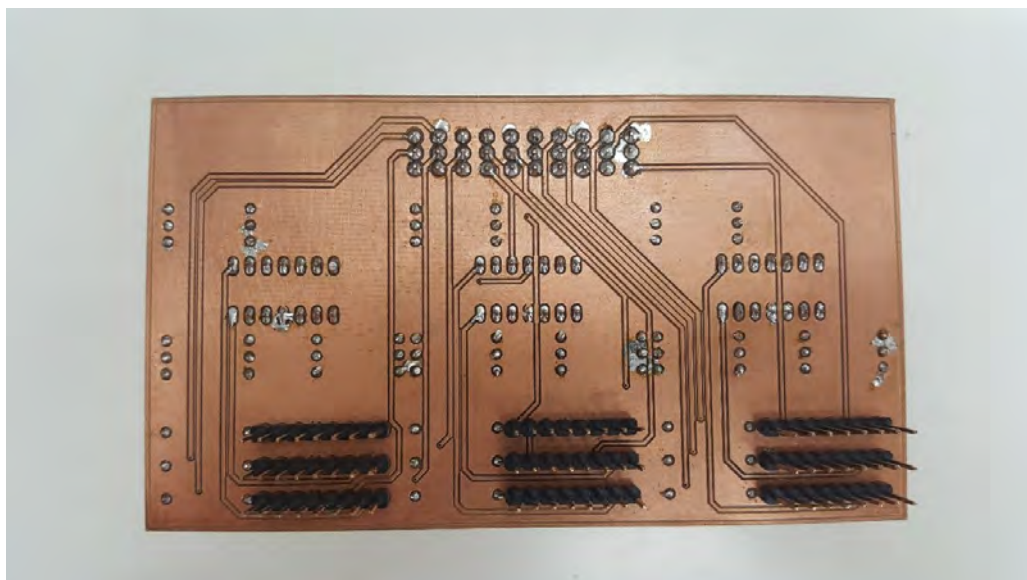


Figura 5.26: Revers de l'Actuator Driver v.1.1.

Per una banda es tracta d'un cable de fàcil obtenció, ja que està disponible a qualsevol comerç especialitzat de consum electrònic. Per altra banda, al tenir 8 pins [70] podem connectar els 6 pins de cada actuator en un sol cable; d'aquesta manera tindrem un cable enumerat per cada actuator (s'indicarà el grup muscular i alçada a la que es troba). A més els dos sensors de temperatura aniran connectats també a través d'un sol cable CAT5. Finalment, el cable CAT5 té un avantatge substancial a nivell físic: la rigidesa de la coberta de PVC permet que sigui fàcil de subjectar i quedi suficientment robust. Destacar que, òbviament, l'excepció de l'ús de cable CAT5 és el cable de 230V, que serà un cable lliure d'halògens, seguint les recomanacions del Reglament de Baixa Tensió [51].

#### 5.4. Visió de conjunt del sistema

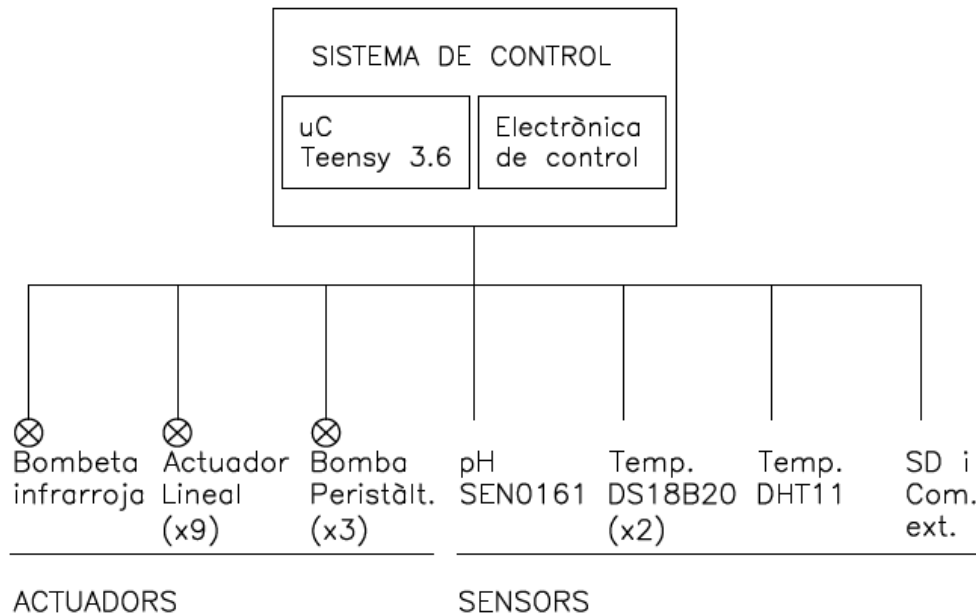


Figura 5.27: Esquema de la configuració del sistema de control (més detall a l'annex C).



## IMPLEMENTACIÓ

L'objectiu d'aquest capítol és descriure el procés de funcionament del prototip i les consideracions per dur-ho a terme. D'aquesta manera, el capítol està dividit en quatre parts. En primer lloc es discutirà la posta en marxa i el procés de preparació de la màquina. Seguidament, tractarem el mode de funcionament durant el procés, tractant el funcionament dels actuadors i sensors, a més del sistema de recollida de mostres líquides i sòlides. A continuació es detallarà el procés de finalització de l'operació. El capítol finalitzarà amb la descripció del mode de testeig, que permetrà al gestor de l'equip dur a terme un diagnòstic del simulador gàstric humà.

### 6.1. Introducció

Un dels aspectes que s'han tingut en compte en avaluar les diferents opcions d'implementació és la facilitat d'ús de l'operari. Aleshores, un usuari que utilitzi el simulador gàstric, no té per què tenir coneixements tècnics d'electrònica ni hauria de programar res. Llavors, un sol programa ha de ser carregat al controlador, i aquest ha de presentar totes les funcions necessàries per satisfer els requeriments de l'usuari. Això implica que els paràmetres de control no han de ser indicats cada vegada que s'utilitza l'equip i que tan sols s'ha de seguir el procés que s'indica a continuació (figura 6.1).

Cal recordar que adjunt a aquest document s'hi annexa tot el codi i la documentació dels programes desenvolupats per dur a terme aquest projecte. Qualsevol especificitat estarà recollida en dita documentació.

### 6.2. Acondicionament i calibració del sistema

En primer lloc, i abans de començar amb el procés de digestió, el simulador gàstric necessita fer un seguit de passos de posada en marxa. Entre altres coses, volem iniciar el sistema amb els actuadors a la posició inicial, haver netejar les bombes i havent calibrat el pH-metre. Per això es seguiràn les següents passes (figura 6.3).

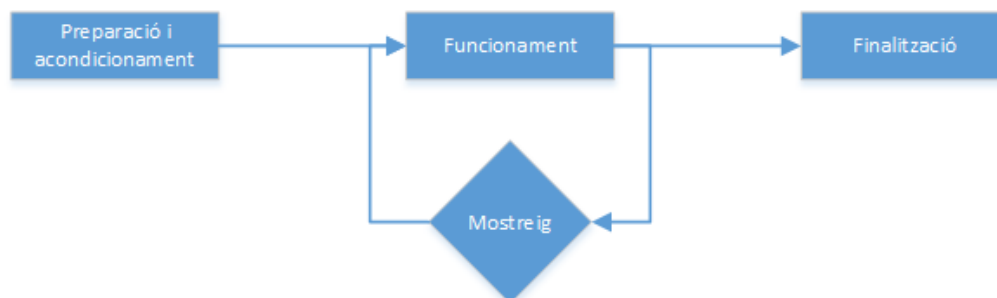


Figura 6.1: Esquema general de funcionament per etapes.

Un cop l'equip estigui engegat el HGS (indicat amb el pilot lluminós), començarem el procés de preparació polsant un cop el botó 1 (el que està situat més a l'esquerra). Aleshores el sistema es començarà a encalentic.

Seguidament es procedirà a netejar els tubs i les bombes amb aigua. Per això situarem els tubs d'entrada i sortida de les bombes en un recipient amb aigua. Llavors polsarem de nou el botó 1 i s'engegaran les bombes, fent circular el líquid per dins els tubs i netejant-los de la brutícia que hi pogués haver. Quan l'usuari decideixi acabar el procés de neteja tan sols haurà de tornar a pitjar el potó 1. A nivell indicatiu que el procés de neteja ha finalitzat la bombeta infraroja parpellejarà dos cops. L'operari situarà els tubs al seu lloc corresponent en el sistema.

Finalment, procedirem a calibrar la sonda de pH. Per això situarem la sonda dins una mostra de pH 7 i es procedirà a fer una calibració d'un punt. Per iniciar la calibració es pitjarà el botó 1 i el procés de calibració es realitzarà automàticament, mitjançant un sistema d'adjust de l'offset respecte pH 7, mitjançant els valors obtinguts de 10 mostres. El sistema indicarà la finalització del procés de calibració de la sonda mitjançant el triple parpelleig de la bombeta infraroja.

El procés de preparació ha finalitzat, i quedarà a l'espera de que l'usuari iniciï el procés de digestió. En aquest període d'espera (que es pot allargar tot el temps que calgui, fins que no s'indiqui el contrari) el simulador gàstric continuarà regulant la temperatura, a fi de que en iniciar el procés de digestió els valors tèrmics siguin els correctes.

Noti's que en aquest període d'espera, l'operari s'encarregarà de verificar que tots els elements del digestor estiguin situats a la posició corresponent, i s'introduirà el vas amb l'àcid clorhídric, així com l'aliment dins la cavitat gàstrica.

Un cop el sistema estigui llest per a ser utilitzat i l'operari vulgui iniciar el procés de digestió, es polsaran els botons 1 i 2 simultàniament.

### 6.3. Digestió

Aquesta és l'etapa pròpiament dita de funcionament, durant la qual es durà a terme el procés de digestió. S'inicia quan una vegada finalitzat el procés d'acondicionament l'operari polsa ambdós botons simultàniament. En aquesta etapa, es farà automàticament el control i regulació dels paràmetres definits (temperatura i pH), es realitzarà el

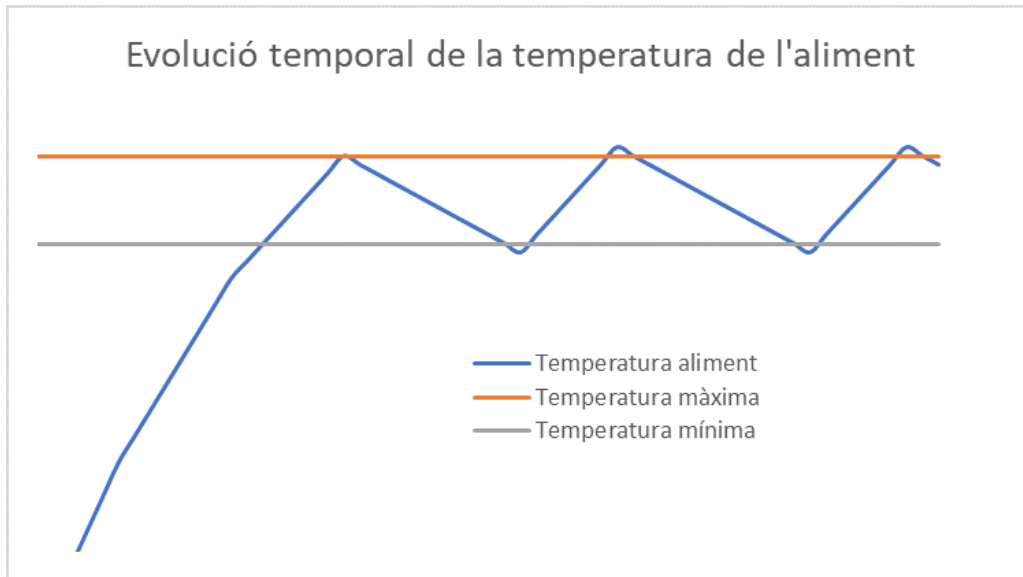


Figura 6.2: Evolució temporal de la temperatura de l'aliment esperada teòricament.

moviment peristàltic, es realitzarà el registre de dades; i, per altra banda, es faran els mostreigs sòlids i líquids quan l'operari ho indiqui.

### 6.3.1. Control de temperatura

Tant pel control de temperatura, el pH i el peristaltisme, el simulador gàstric anirà avaluant cada instant aquests valors i si es necessari actuarà segons s'ha previst.

En el cas de la temperatura, el sistema recull la temperatura de les dues sondes i en fa la mitjana aritmètica. En aquest punt, si la temperatura actual és major que la temperatura màxima, s'apagarà la bombeta infraroja. Per contra, si la temperatura és inferior a la mínima s'engegarà la bombeta. Noti's que això implica que quan la temperatura de l'aliment està entre els límits del sistema, la bombeta no canviarà l'estat. Aleshores, l'evolució de la temperatura s'estima que seguirà el patró de la figura 6.2.

### 6.3.2. Control de pH

Com es va comentar en capítols anteriors, per fer el control de pH tenim una bomba específica per fer les mostres de pH, i aquesta sempre estarà en funcionament. Es fan un seguit de 10 mostres consecutives del pH i es treu la mitjana aritmètica, si el valor del pH és superior al pH màxim aleshores s'engegarà la bomba d'àcid clorhídric durant 2 segons. Aleshores, s'aniran fent secrecions de 2 segons fins que el pH estigui al nivell adequat.

### 6.3.3. Control del peristaltisme

El simulador gàstric va avaluant en cada instant el temps que du de funcionament. Inicialment, s'acciona el primer grup muscular mentre que la resta estan en posició de

recollida. No obstant, en superar un període de temps, el grup muscular es recollirà i s'accionarà el pròxim. A més, la velocitat dels accionaments es mantindrà sempre constant segons un paràmetre de configuració fixat.

### 6.3.4. Mostreig de líquid i sòlid

En qualsevol moment del procés l'usuari podrà dur a terme la recollida d'una mostra sòlida o líquida. Per això tan sols s'haurà de pitjar un dels botons.

En cas de voler prendre una mostra sòlida, l'operari seleccionarà el botó 1. Llavors, els actuadors es recolliran i la bombeta parpellejarà 3 cops. Aleshores l'operari podrà recollir la mostra de manera manual. Un cop s'hagi recollit la mostra i l'operari no estigui manipulant dins el bastidor, s'haurà de tornar a pitjar el botó 1 per reprendre l'activitat normal.

En cas de voler obtenir una mostra líquida, s'haurà de mantenir premut el botó 2 i s'indicarà el procés amb un parpelleig de la bombeta. Durant el temps que l'operari mantingui premut el botó 2, la bomba de mostreig estarà funcionant, transportant el líquid al vas prèviament dipositat. Un cop s'amolli el botó 2, la bombeta parpellejarà i el líquid aturarà de brollar.

## 6.4. Finalització

El procés de digestió continuarà indefinidament fins que l'operari consideri, moment en el que pitjarà novament els botons 1 i 2 per procedir a la fase de finalització.

En aquesta fase, s'aturaran els sistemes de control: es recolliran els actuadors, s'apagaran les bombes i la bombeta infraroja. Es tracta d'un període per recollir el material digestiu i netejar els equips per recollir el digestor.

Aleshores, de manera anàloga a la fase inicial, es netejaran els tubs. Per això es tornaran a situar els extrems d'aquests dins un recipient amb aigua i es farà la recirculació d'aigua per netejar qualsevol resta de material de la digestió. En voler iniciar el procés de recirculació d'aigua es polsarà el botó 1, i aquest funcionarà fins que es polsi novament aquest mateix botó per finalitzar la neteja.

En aquest moment el procés de digestió ja ha acabat i podem apagar el simulador gàstric (amb l'interruptor) i després el desendollarem de la xarxa elèctrica.

## 6.5. Mode testeig

Per facilitar el manteniment dels equips i dur a terme un diagnòstic del simulador, s'ha implementat un mode de testeig. Per accedir a aquest mode s'haurà de mantenir polsat el botó 2 durant 5 segons (a fi d'evitar en aquest mode per error) durant l'engegada de l'equip (enlloc de pitjar el botó 1 per començar la fase d'inicialització).

En aquest mode la comunicació serie estarà activada (la comunicació es farà a 9600 bauds), a través del port USB del controlador Teensy 3.6, i permetrà validar el correcte funcionament de tots els equips. Anem a veure les diferents funcionalitats:

- Pulsació botó 1: 1 parpadeig del llum infraroig i retorn pel port sèrie del missatge “Botón 1 pulsado”
- Pulsació botó 2: 2 parpellejos de la bombeta i retorn de “Botón 2 pulsado”
- Pulsació botó 1 i 2 simultàniament: 3 parpellejos i retorn “Boton 1 y 2 pulsados”
- Enviar “a”: Engegar bomba de mostreig
- Enviar “A”: Apagar bomba de mostreig
- Enviar “s”: Engegar bomba de recirculació de pH
- Enviar “S”: Apagar bomba de recirculació de pH
- Enviar “d”: Engegar bomba d'àcid
- Enviar “D”: Apagar bomba d'àcid
- Enviar “f”: Engegar bombeta infraroigs
- Enviar “F”: Apagar bombeta infraroigs
- Enviar “q”: Allargar grup muscular 1
- Enviar “Q”: Recollir grup muscular 1
- Enviar “w”: Allargar grup muscular 2
- Enviar “W”: Recollir grup muscular 2
- Enviar “e”: Allargar grup muscular 3
- Enviar “E”: Recollir grup muscular 3
- Enviar “r”: Allargar tots els grups musculars
- Enviar “R”: Recollir tots els grups musculars
- Enviar “t”: Retorn del valor de temperatures: temperatura interna (mitjana amb-dós sensors), temperatura externa i humitat externa
- Enviar “T”: Retorn del valor del pH-metre

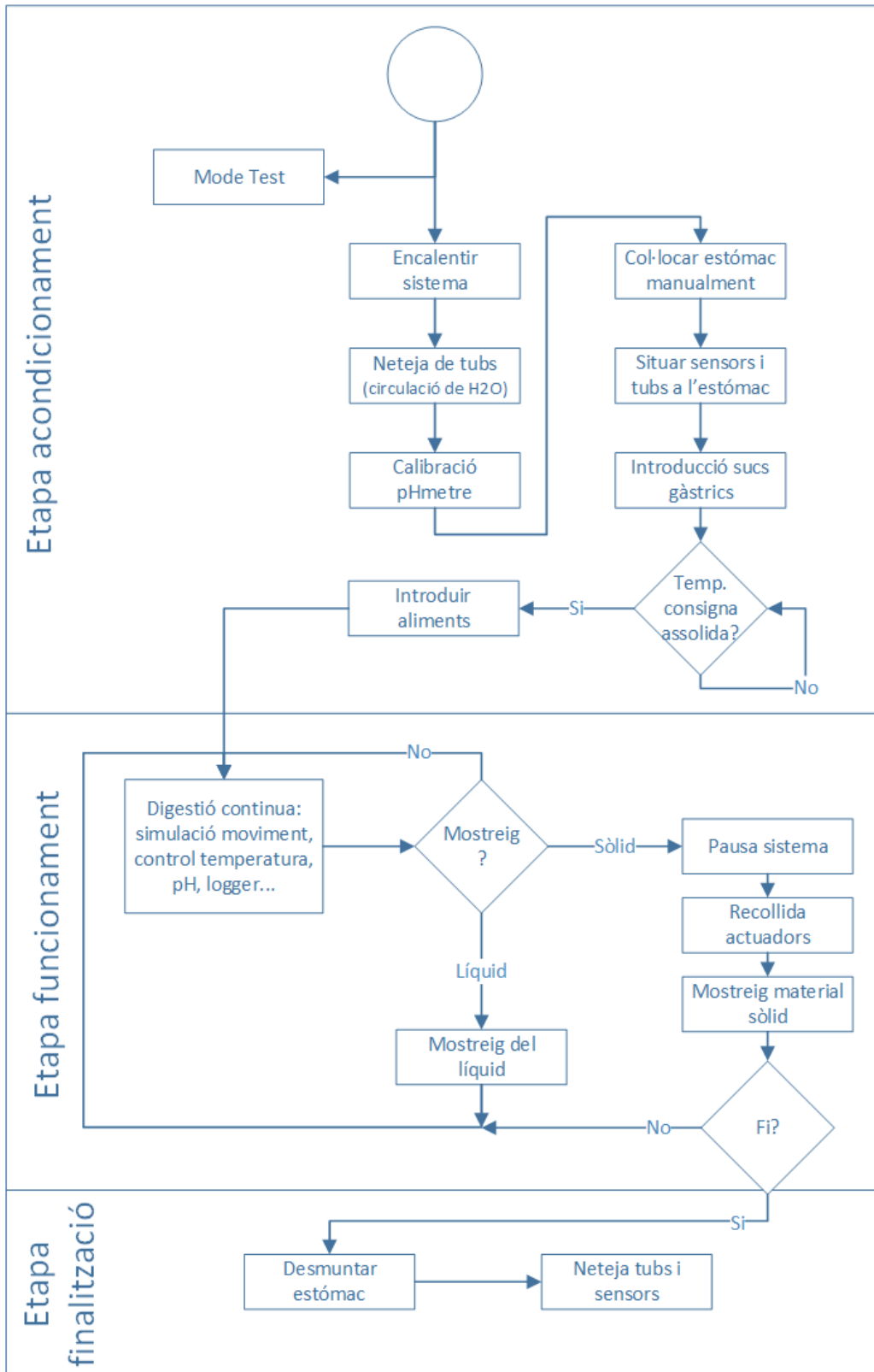


Figura 6.3: Esquema complet del funcionament del sistema.

## RESUM ECONÒMIC DEL PROJECTE

En aquest capítol farem un breu repàs a les consideracions econòmiques del projecte. Principalment, s'estudiaran els costos directes derivats del desenvolupament del digestor, tenint en compte el material necessari, les hores del personal implicat i despeses diverses com pugui ser amortització de les instal·lacions i equips emprats.

És important considerar que s'espera un cost elevat del projecte degut a la pròpia naturalesa d'aquest, ja que al ser un treball de recerca i investigació no podem aprofitar economies d'escala, i en alguns casos s'haurà d'experimentar amb diverses solucions per un mateix problema, o bé realitzar diferents iteracions (com n'és el cas de les plaques i les pinces). Això implica que per naturalesa, aquest estudi és de caràcter informatiu i no s'ha d'interpretar pas com a model fidedigne de model de negoci en que pugui desembocar el projecte.

Per dur a terme l'estudi de costos, s'ha dividit el projecte en 5 etapes diferenciades: recerca, disseny, muntatge, programació i documentació. Aquestes etapes es diferencien tant per finalitat com per temporalitat, ja que és així com s'ha desenvolupat aquest treball. A la taula 7.1 veim el cost associat a cada una d'aquestes etapes.

Analitzant aquesta primera aproximació, s'observa que el principal cost no és pas la fabricació sinó els processos de recerca i desenvolupament (format per l'etapa de recerca, disseny, programació i documentació). Així doncs, si es fabricassin varies unitats del simulador gàstric, tan sols augmentaria el cost de muntatge, ja que la resta són costos directes fixes independents de les unitats de fabricació.

A nivell descriptiu dels diferents conceptes que conformen el cost d'una etapa trobam la taula 7.2. En aquesta es detallen de manera individual tots els costos segons l'etapa. Noti's que es tenen en compte tant costos materials com personals, així com l'amortització de les instal·lacions i els equips de treball. Per exemple, s'estima el cost d'amortització de les instal·lacions a 50€ mensuals en el cas d'oficines i 300€ mensuals en el cas de tallers. Aquesta aproximació s'ha fet a partir dels valors de mercat d'arrendament i compra de la zona de Palma.

El mateix ocorre en el cas del cost de personal. Per aproximar aquest es té en compte el tipus de feina i el nivell de titulació requerit per a dur a terme la tasca. D'aquesta

<b>Etapa</b>	<b>Cost associat</b>	
Recerca	9150	€
Disseny	10220	€
Muntatge	13668	€
Programació	6700	€
Documentació	13050	€
<b>Total</b>	<b>52788</b>	<b>€</b>

Taula 7.1: Enumeració dels costos materials i personals del projecte.

manera, els costos de personals són equivalents als preus de mercat reals: 30€/hora per feina auxiliar, 40€/h per la feina de tècnic titulat i 80€/hora per la feina de consultoria i assessorament per un expert en la matèria. Pel que fa al volum d'hores de dedicació de personal aquestes són una aproximació a la baixa de les hores de dedicació reals del projecte, dades obtingudes a partir del registre de feina elaborat.

Com a nota afegida, i com s'ha avançat anteriorment, es tracta d'un projecte de recerca i donat que sols es fabrica un prototip el cost individual és alt. No obstant, si es fabriquessin més unitats els costos directes fixos es repartirien. En el cas de fabricar 10 simuladors gàstrics, per exemple, tindríem el mateix cost de recerca, disseny, programació i documentació (39120€ total) i el cost del muntatge seria l'únic que augmentaria de manera proporcional (13668€ per unitat), tot i que realment seria menys degut a economies d'escala i capacitat de negociació amb proveïdors. Aleshores, en aquest supòsit el cost total de fabricar 10 unitats seria de 175800€, és a dir, 17580€ per equip. Si comparem aquest valor amb el cost obtingut de fabricar un sol equip (52788€) observem que existeix una diferència de més del 65%.

Per això considerem que es pot estudiar la viabilitat del projecte a nivell comercial. Considerant que sols es fabricàs un lot de 10 unitats, i s'apliques un marge comercial del 40% respecte el preu de venda, podríem comercialitzar el simulador gàstric entorn dels 30000€. Per tant, s'espera que en cas de dur a terme un estudi de mercat per la viabilitat econòmica del producte s'estimi el preu de l'equip per sobre d'aquest rang de preus.



<b>Etapa</b>	<b>Concepte</b>	<b>Quantitat</b>		<b>Cost unitari</b>		<b>Cost total</b>	
Recerca	Estudi del procés de digestió	150	hores	30	€/h	4500	€
Recerca	Recerca sobre l'estat de l'art	150	hores	30	€/h	4500	€
Recerca	Amortització instal·lacions	3	mesos	50	€/mes	150	€
Recerca	<b>Total</b>					<b>9150</b>	<b>€</b>
Disseny	Disseny del sistema	100	hores	40	€/h	4000	€
Disseny	Disseny plaques electròniques	50	hores	40	€/h	2000	€
Disseny	Disseny pinces	20	hores	40	€/h	800	€
Disseny	Assessorament - tècnic	10	hores	40	€/h	400	€
Disseny	Assessorament - professorat	20	hores	80	€/h	1600	€
Disseny	Fabricació plaques (preu ext.)	10	unitats	47	€/unitat	470	€
Disseny	Fabricació pinces (preu ext.)	10	unitats	50	€/unitat	500	€
Disseny	Llicències software (versió edu.)	1	unitats	0	€/unitat	0	€
Disseny	Amortització instal·lacions	3	mesos	50	€/mes	150	€
Disseny	Procés de compra	10	hores	30	€/h	300	€
Disseny	<b>Total</b>					<b>10220</b>	<b>€</b>
Muntatge	Material elèctric - Dielectro	1	unitats	96,47	€/unitat	96,47	€
Muntatge	Material electrònic - Mouser	1	unitats	132,22	€/unitat	132,22	€
Muntatge	Material Actuadors	1	unitats	112,03	€/unitat	112,03	€
Muntatge	Material elèctric - SiR	1	unitats	80,44	€/unitat	80,44	€
Muntatge	Material muntatge - Sub. Man.	1	unitats	33,73	€/unitat	33,73	€
Muntatge	Material Metacrilat	1	unitats	73	€/unitat	73	€
Muntatge	Material bastidor - Leroy Merlin	1	unitats	90	€/unitat	90	€
Muntatge	Material - Miscel·lània	1	unitats	100	€/unitat	100	€
Muntatge	Procés de muntatge	300	hores	40	€/h	12000	€
Muntatge	Desplaçaments a proveïdors	5	visites	10	€/visita	50	€
Muntatge	Amortització instal·lacions i material	3	mesos	300	€/mes	900	€
Muntatge	<b>Total</b>					<b>13667,89</b>	<b>€</b>
Programació	Disseny i codi	150	hores	40	€/h	6000	€
Programació	Amortització instal·lacions	2	mesos	50	€/mes	100	€
Programació	Amortització equips informàtic	16	mesos	37,5	€/mes	600	€
Programació	Software (licències edu.)	0	unitats	0	€/unitat	0	€
Programació	<b>Total</b>					<b>6700</b>	<b>€</b>
Documentació	Redacció de la documentació	300	hores	40	€/h	12000	€
Documentació	Revisió de la documentació	10	hores	80	€/h	800	€
Documentació	Maquetació i impressió	4	unitats	40	€/unitat	160	€
Documentació	Amortització instal·lacions	3	mesos	30	€/mes	90	€
Documentació	<b>Total</b>					<b>13050</b>	<b>€</b>
<b>Total</b>						<b>52787,89</b>	<b>€</b>

Taula 7.2: Enumeració dels costs materials i personals del projecte.



## CONCLUSIONS

El projecte de disseny i construcció del digestor gàstric s'enmarca en el projecte RTA2015-00060-C04-03 [71], dirigit pel grup d'Enginyeria Agroalimentària del departament de Química de la Universitat de les Illes Balears. Aquest treball és una proposta de com donar solució a als requeriments, ajuntant els esforços per part del grup d'Enginyeria Agroalimentària i el grup d'Enginyeria Electrònica.

La recerca feta no sols comprèn un estudi exhaustiu dels diferents tipus de digestors gàstrics, sinó també un estudi del procés de digestió en éssers humans. La solució proposada en aquest prototip permet emular la correcta evolució del peristaltisme, a més de permetre el control dinàmic de les variables habituals en digestors monocompartamentals. Cal recalcar que aquest simulador no sols pretén obtenir els mateixos resultats que en humans, sinó que pretén replicar de la manera més acurada possible el comportament dinàmic del cos humà, complint els objectius enumerats al Capítol 1.

Les etapes d'aquest projecte han estat:

1. Recerca sobre el procés de digestió: Com s'ha vist al capítol 2, s'ha aprofundit sobre els conceptes de la digestió, basant-nos en la bibliografia d'estudi de l'alumnat de medicina.
2. Estudi i valoració dels simuladors gàstrics: En el capítol 3 hem repassat les propostes més avançades i robustes de diferents centres de recerca del món. Llavors, hem valorat quins són els trets més representatius de cada tipologia i les seves mancances.
3. Disseny del prototip: Aquesta etapa la podem dividir en tres parts diferenciades. Per una banda, al capítol 4 s'ha estudiat el model de la digestió, a fi de poder desenvolupar un disseny físic robust, mostrat al capítol 5. Finalment, al capítol 6, es mostra el funcionament del prototip i les seves capacitats, així com el desenvolupament del codi de programació.
4. Redacció de la documentació: L'elaboració d'aquesta memòria té l'objectiu de recopilar la informació bàsica del treball desenvolupat durant aquests anys.

En conclusió, hem desenvolupat un prototip per simular el procés de digestió gàstrica en humans, complint els objectius fixats a l'inici del projecte i obrint una possible nova línia d'investigació dins la Universitat de les Illes Balears.

### 8.1. Experiència

Aquest projecte és un treball de recerca i desenvolupament dut a terme de manera individual i amb la col·laboració de varis membres de la Universitat. El treball s'emmarca dins un projecte d'investigació cofinançat pel Fons Social Europeu i que es desenvolupa al grup d'Enginyeria Agroalimentària de l'àrea d'Enginyeria Química de la UIB.

L'inici d'aquest projecte fou a l'octubre de l'any 2017, moment en el que vam començar a treballar conjuntament amb la doctora Maria Esperança Dalmau i la catedràtica i doctora Susana Simal. De llavors fins a l'octubre de l'any 2018, la realització del projecte es va desenvolupar a diari dins les instal·lacions del grup d'Enginyeria Agroalimentària, dirigit per la doctora Carmen Rosselló. Durant aquest període es va fer tot el procés de recerca bibliogràfica, el disseny i desenvolupament dels principals equips (plaques de control i *drivers*, actuadors i fabricació de pinces, compra de material pel bastidor, etc.) i el seu testeig individual. És durant aquesta fase d'estudi tècnic quan les instal·lacions i personal del grup d'Enginyeria Electrònica es fa patent. En especial, l'assessorament del professorat d'enginyeria, els consells del personal tècnic i les revisions per part del tutor de projecte el Dr. Miquel Roca són claus a l'hora de decidir entre les diferents propostes que van sorgint.

A partir del mes d'octubre i fins el mes de febrer de l'any 2019 es va procedir al muntatge i integració de tots els equips, entregant en aquesta data el simulador gàstric ja ensamblat i completat.

De llavors i fins a la data de publicació d'aquest document s'ha treballat en el compendi de la informació generada i la redacció d'aquesta memòria tècnica. Aquesta darrera etapa s'ha realitzat a la ciutat de Barcelona, compaginant-la amb la feina que allà s'hi presta.

Es tracta doncs d'un projecte de gran abast, tractant diferents àrea tècniques i científiques, oferint l'oportunitat de treballar i millorar les habilitats en:

- recopilar informació i aprendre sobre el procés digestiu,
- aprendre sobre la tasca dels simuladors gàstrics, les tipologies i el seu funcionament,
- aprofundir en l'estudi sobre controladors, sensors i actuadors,
- millorar les capacitats de programació en C i l'ús d'eines CAD (SolidWorks i Eagle),
- aprendre a dissenyar correctament i les conseqüències de no fer-ho,
- entendre les fases involucrades en el desenvolupament de productes: gestió de temps, gestió de recursos limitats, gestió de les capacitats i febleses,
- adquirir experiència en el camp de la recerca i el món acadèmic,

- redacció de documentació tècnica,
- gestió i superació d'entrebancs i limitacions.

## 8.2. Treball realitzat

Aquest projecte s'ha desenvolupat usant eines de fonts externes i també recursos propis.

La realització d'aquest projecte fou proposat pel doctor Miquel Roca com a Treball de Final de Màster a partir de la iniciativa de la doctora Susana Simal, configurant-se com a coordinadors d'aquest projecte. El disseny del digestor gàstric té com a punt de sortida el desenvolupament de la Universitat de Califòrnia a Davis, sent col·laboradora en el projecte RTA2015-00060-C04-03 la professora Dra. Gail Bornhorst, qui durant la seva estada a Palma l'any 2018 ens va assessorar i explicar limitacions no documentades del seu prototip proposat.

El sistema de control peristàltic s'ha desenvolupat de forma original, sent la primera iteració d'aquest tipus de mecanismes per fer emular el comportament del grups musculars durant la peristalsis. El sistema de control de pH mitjançant recirculació i l'estructura del bastidor han estat dissenyats especialment per aquest projecte. Així mateix, el codi principal del controlador i les llibreries s'han fet a mida pels requeriments d'aquesta proposta, si bé, també s'ha fet ús de llibreries de tercers en el cas dels sensors de temperatura i pH.

El disseny dels esquemes elèctrics, el procés de fabricació, soldadura i muntatge s'ha realitzat en la seva totalitat per aquest projecte, suportant-se en el personal de la universitat i en part realitzat al laboratori d'electrònica del grup de recerca del Dr. Roca. De manera similar, el disseny de les pinces s'ha desenvolupat a títol personal però fabricat gràcies a l'ajuda d'Andreu Figuerola de l'àrea de Química Analítica, qui utilitzà els equips d'impressió del grup per donar vida a les nou peces fabricades.

El muntatge del bastidor i assemblatge de tot el model gàstric s'ha realitzat a cavall entre les instal·lacions universitàries i particulars, permetent una major flexibilitat tant horària com d'espai. La redacció documental s'ha realitzat íntegrament en instal·lacions pròpies.

## 8.3. Recerca i desenvolupament futur

Aquest projecte ha obert diferents línies de continuació tant en matèria de recerca com de la millora de l'equip existent. Algunes de les possibilitats que es podrien considerar per donar continuïtat al projecte són:

- Millorar la implementació del codi, optimitzant carències i finalitzar el sistema de registre de dades.
- Connectar el simulador, mitjançant el port de comunicacions habilitat, a un sistema extern (un ESP32, per exemple) que permeti accedir a les dades des del núvol.
- Realitzar diferents proves de funcionament, a fi de validar la correcta operació de l'equip, i corregir les possibles falles.

- Utilitzar l'equip per estudiar l'evolució dels aliments en la digestió gàstrica.
- Emprar l'equip per estudiar la degradació de medicaments de via oral.
- Realitzar una comparativa dels resultats obtinguts amb el digestor desenvolupat i els estudiats en el capítol 3.
- Connectar el simulador a un sistema de HMI (interfície d'usuari per aplicacions industrials), a fi de poder modificar els paràmetres de control i veure els paràmetres en temps real.
- Crear un servei cloud, al qual es pugui fer un volcat directe de la informació de la memòria SD. Aquest servei proveirà gràfics de dades i la informació rellevant de manera instantània, sense haver de recórrer a eines ofimàtiques o estadístiques (Excel o R, per exemple).
- Estudiar el mercat i la viabilitat de la comercialització d'aquest equip.

### 8.4. Agraïments

Finalment, no podem acabar aquest document sense agrair l'ajuda en tot moment dels tutors, Dr. Miquel Roca i la Dra. Susana Simal, qui han fet possible aquest projecte. A més, agrair a la companya Dra. Maria Esperança Dalmau qui, a part de compartir espai de feina, em va ajudar en tot moment i em va aconsellar en els assumptes de química. Allargar aquest agraïment a la resta de companys del grup d'Enginyeria Agroalimentària, per les hores de feina i suport, els descansos i moltes anècdotes i dinars. A més, també cal recalcar l'ajuda dels responsables del laboratori d'electrònica, en especial a Mateu Fernández, qui donà consell sobre el disseny de les plaques electròniques i finalment les fabricà amb la impressora de PCB en les seves instal·lacions.

També agrair a la meva família el suport durant tots aquests anys de projecte, i en especial en els moments més difícils. En concret, destacar l'ajuda de la meva parella, Montse, qui m'ha donat una mà des de l'inici amb la terminologia i conceptes de medicina. Finalment, destacar l'ajuda del meu pare, Toni, pels seus consells sobre el disseny i donar-me una mà amb el muntatge i assemblatge del simulador. Sense aquest grup de persones aquest projecte no hauria pogut materialitzar-se.

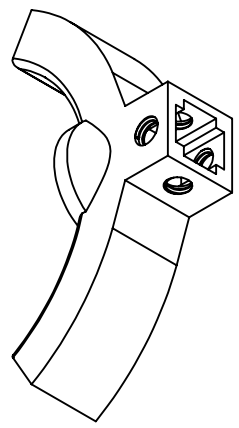
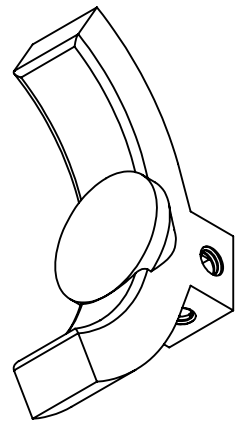
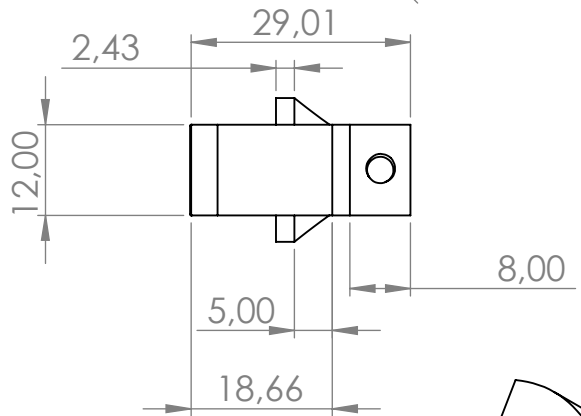
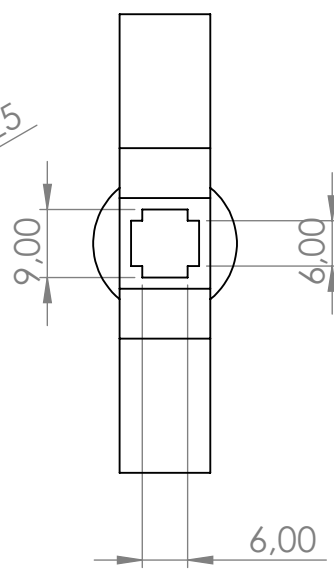
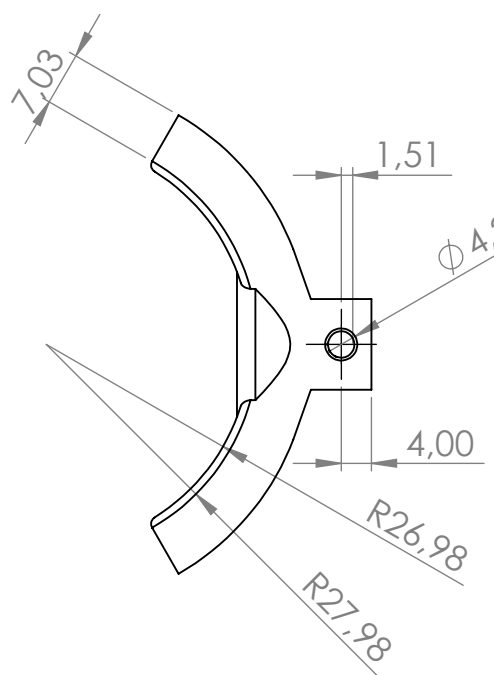
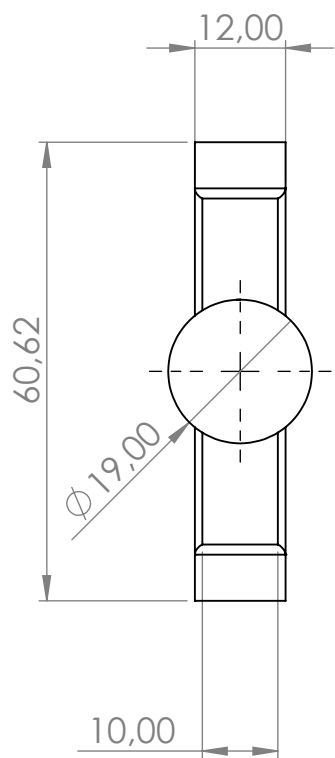


## PLÀNOLS DE LES PINCES

## A. PLÀNOLS DE LES PINCES

---





NAME	MIQUEL FONT MAS	REVISION	1.3
		DATE	01/09/2020
TITLE: SIMULADOR GÁSTRIC HUMÀ. TERMINACIÓ ACTUADOR LINEAL DE PERISTALTISME			
DWG NO.	Pinça HGS		A1
SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1		



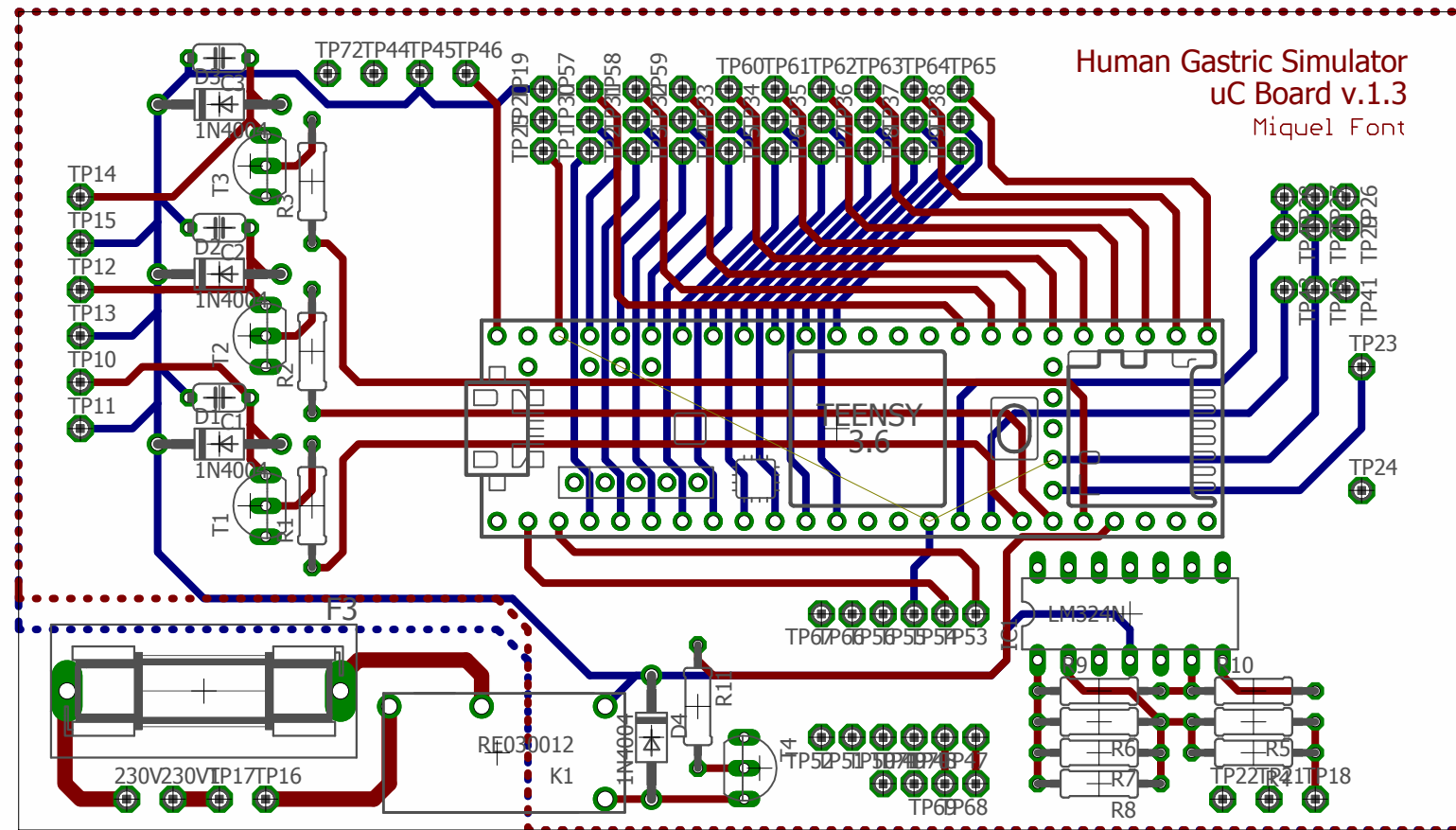
APÈNDIX



**B**

**PLÀNOLS DELS CIRCUITS ELECTRÒNICS**





**Universitat**  
de les Illes Balears

Autor:  
Miquel Font i Mas

Tutor:  
Dr. Miquel Jesús Roca Adrover

Plànol: uC Board v.1.3: Disposició de la PCB

Treball de Final de Màster  
Màster en Enginyeria Industrial  
Universitat de les Illes Balears

PROJECTE: SIMULADOR GÀSTRIC HUMÀ:  
Disseny d'un digestor centrat en la replicació  
del peristaltisme

Escala: n/d

Data:  
27 de desembre  
del 2018

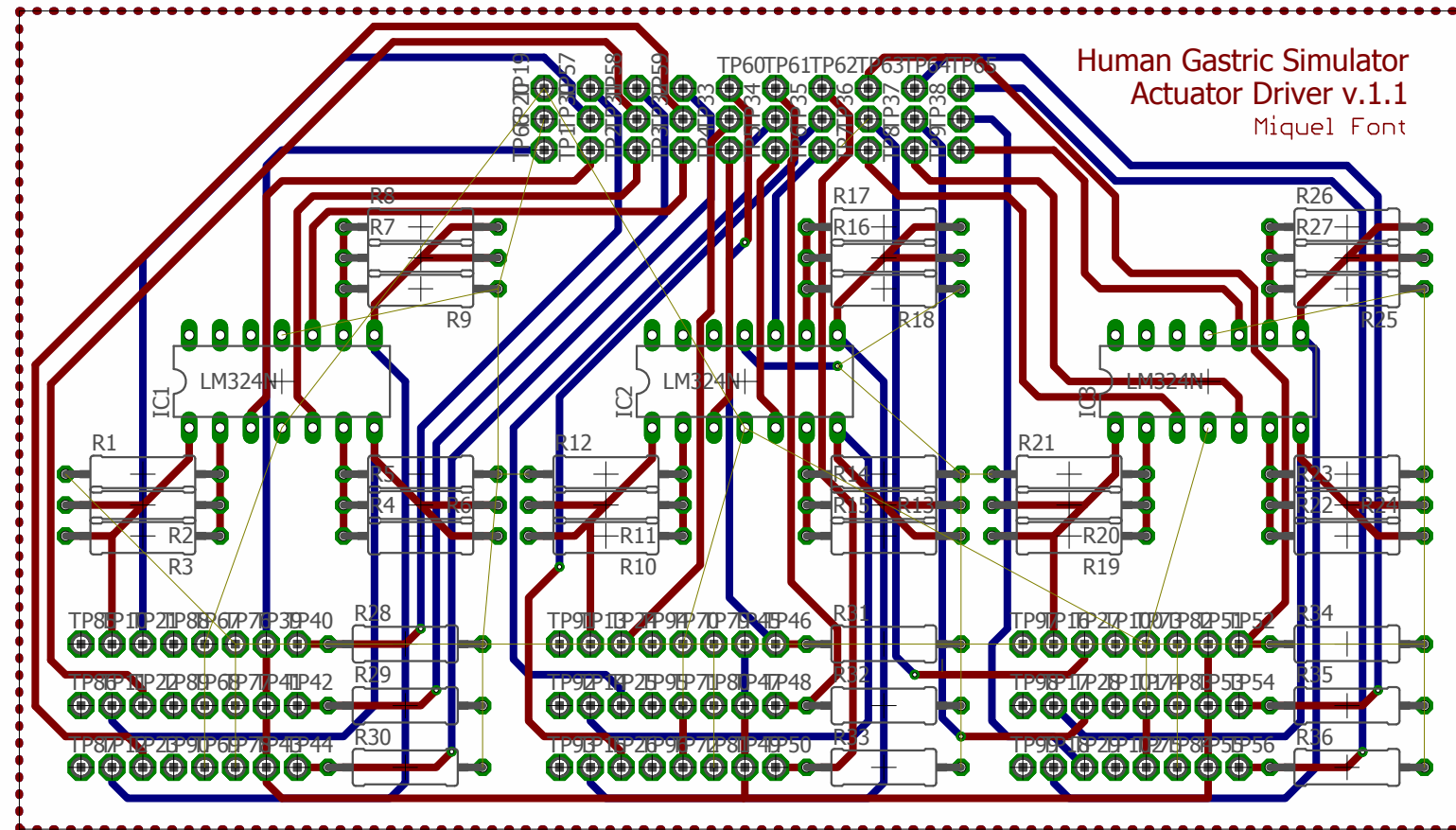
Nº: B1











**Universitat**  
de les Illes Balears

Autor:  
Miquel Font i Mas

Tutor:  
Dr. Miquel Jesús Roca Adrover

Plànol: Actuator Driver v.1.1: Disposició de la PCB

Treball de Final de Màster  
Màster en Enginyeria Industrial  
Universitat de les Illes Balears

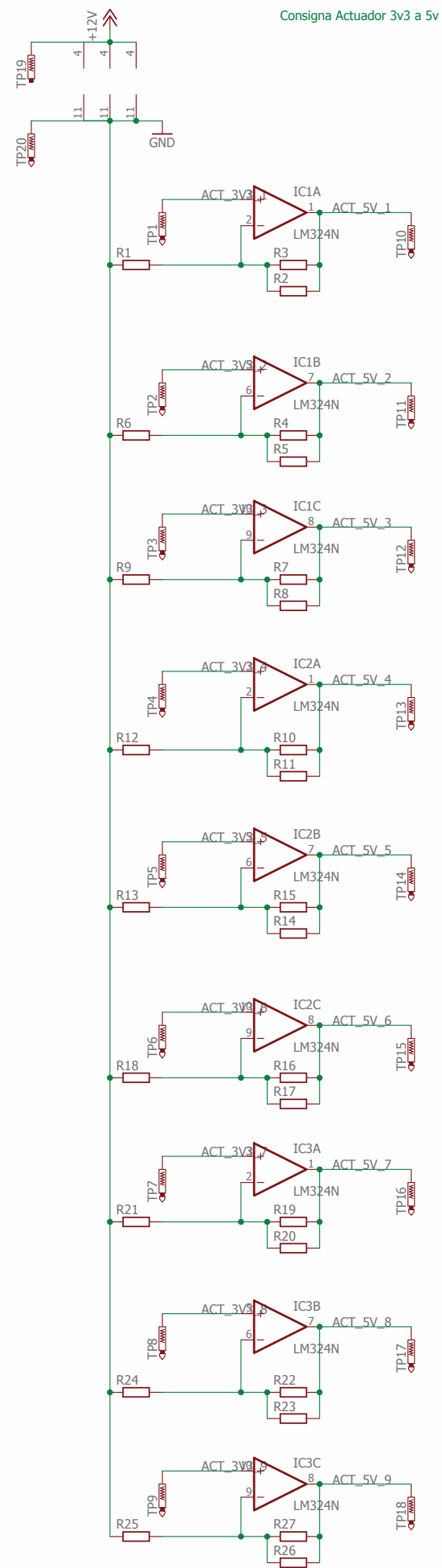
PROJECTE: SIMULADOR GÀSTRIC HUMÀ:  
Disseny d'un digestor centrat en la replicació  
del peristaltisme

Escala: n/d

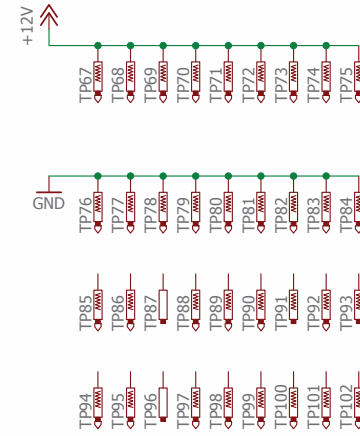
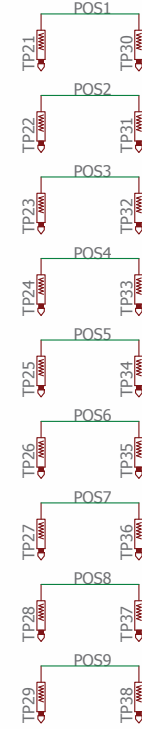
Data:  
27 de desembre  
del 2018

Nº: B3

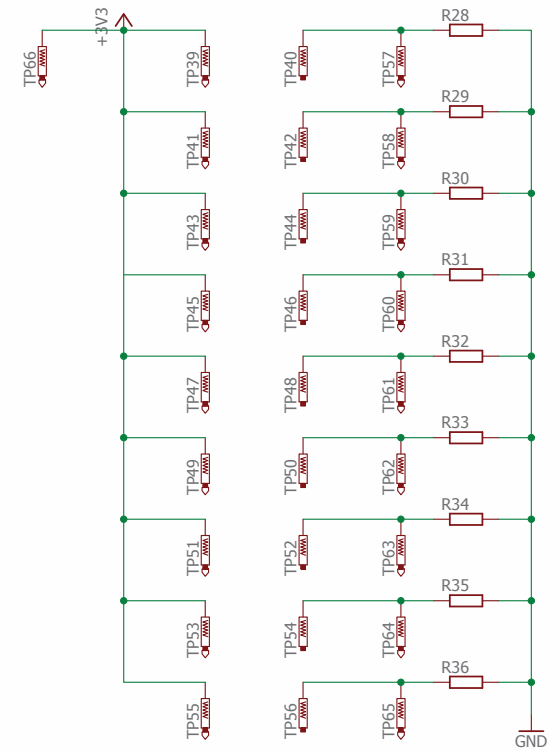




Position feedback 3v3



Pin uC 3V3 Pin1 FSR Pin2 FSR Pin uC FSR reading



Universitat  
de les Illes Balears

Autor:  
Miquel Font i Mas

Tutor:  
Dr. Miguel Jesús Roca Adrover

PROJECTE: SIMULADOR GÀSTRIC HUMÀ:  
Disseny d'un digestor centrat en la replicació  
del peristaltisme

Plànol: Actuator Driver v.1.1: Esquema de connexions

Treball de Final de Màster  
Màster en Enginyeria Industrial  
Universitat de les Illes Balears

Escala: n/d

Data:  
27 de desembre  
del 2018

Nº: B4





**Universitat**  
de les Illes Balears

Autor:  
Miquel Font i Mas

Tutor:  
Dr. Miquel Jesús Roca Adrover

Plànol: Taula de connexions controlador / actuator

Treball de Final de Màster  
Màster en Enginyeria Industrial  
Universitat de les Illes Balears

PROJECTE: **SIMULADOR GÀSTRIC HUMÀ:**  
Disseny d'un digester centrat en la replicació  
del peristaltisme

Escala: n/d

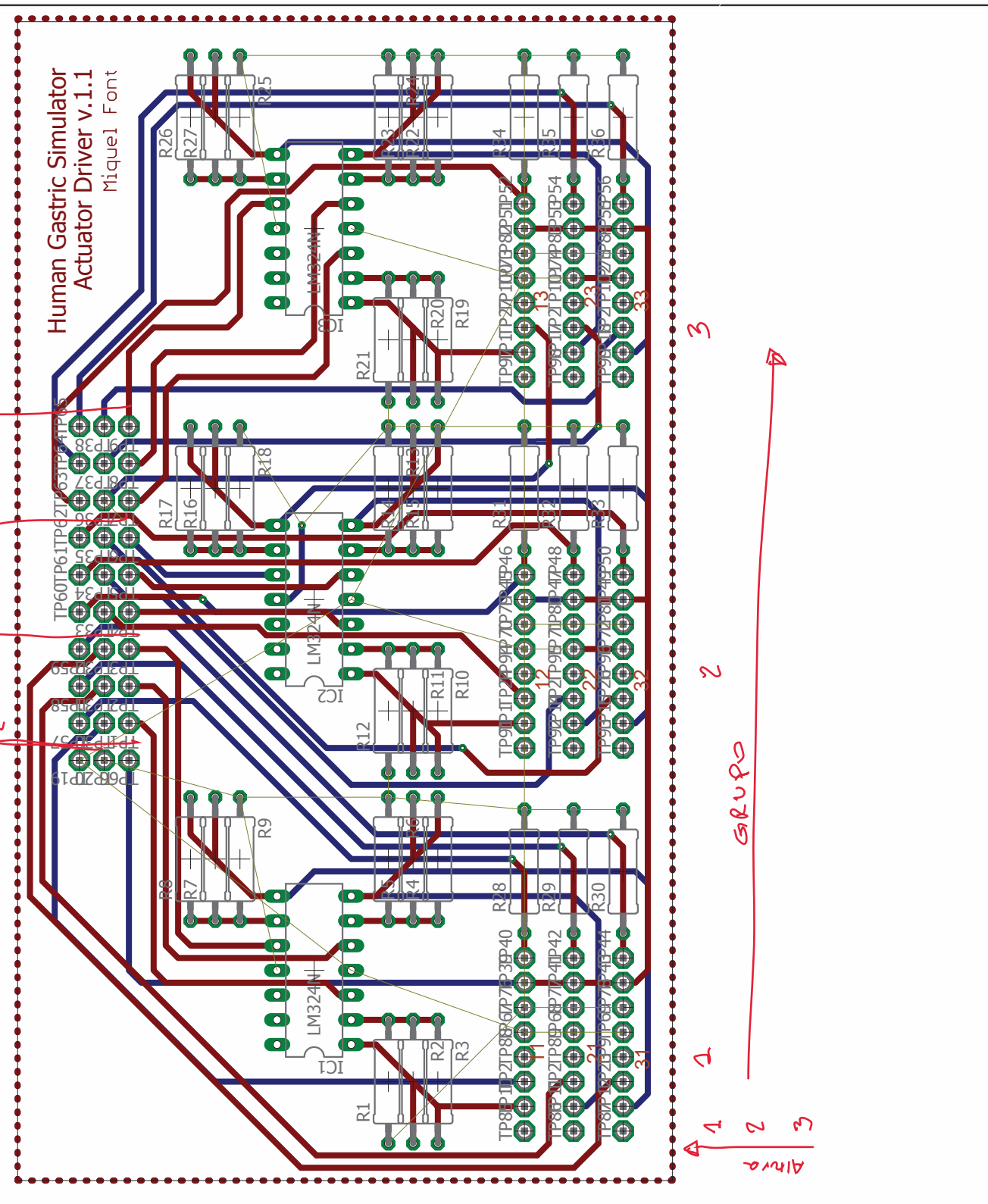
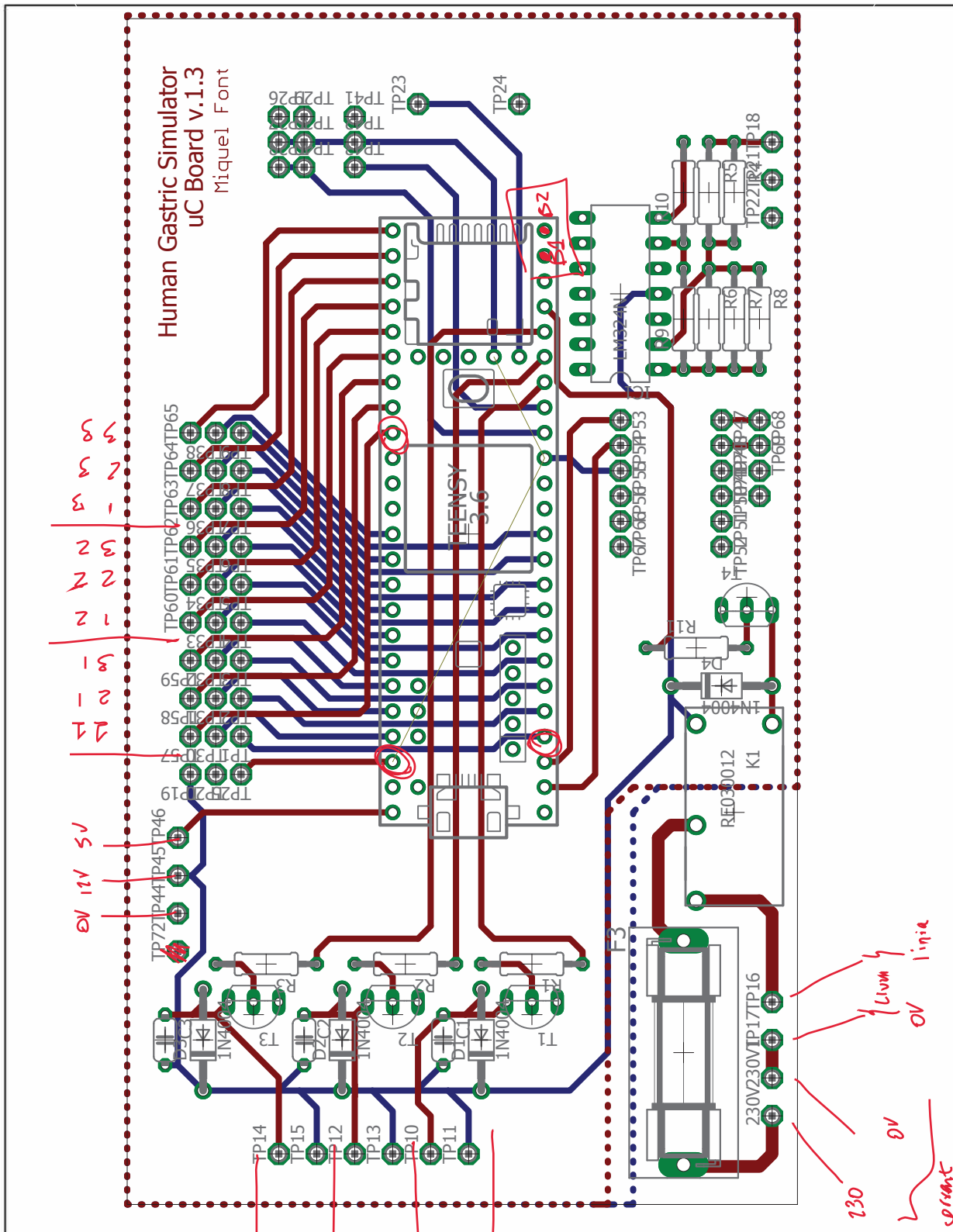
Data:  
27 de desembre del  
2018


Nº: **B5**

Connexió uControlador				
Actuador	Connexió uControlador		Força Vo	
	TP	Feedback 3V3	TP	Força Vo
1	1	30	57	
2	2	31	58	
3	3	32	59	
4	4	33	60	
5	5	34	61	
6	6	35	62	
7	7	36	63	
8	8	37	64	
9	9	38	65	

Connexió Actuador									
Actuador	Connexió Actuador			TP			Força Vo		
	TP	Consigna 5V	Feedback 3V3	TP	12V	0V	TP	FSR 3V3	TP
1	x	10	21	x	67	76	x	39	40
2	x	11	22	x	68	77	x	41	42
3	x	12	23	x	69	78	x	43	44
4	x	13	24	x	70	79	x	45	46
5	x	14	25	x	71	80	x	47	48
6	x	15	26	x	72	81	x	49	50
7	x	16	27	x	73	82	x	51	52
8	x	17	28	x	74	83	x	53	54
9	x	18	29	x	75	84	x	55	56





	Autor: Miquel Font i Mas	Plànol: uC Board v.1.3 i Actuator Driver v.1.1: Annotacions tècniques sobre la dposició de la PCB	
	Tutor: Dr. Miquel Jesús Roca Adrover	Treball de Final de Màster Màster en Enginyeria Industrial Universitat de les Illes Balears	
PROJECTE: SIMULADOR GÀSTRIC HUMÀ: Disseny d'un digestor centrat en la replicació del peristaltisme		Escala: n/d	Data: 5 de gener del 2019
			N°: B6



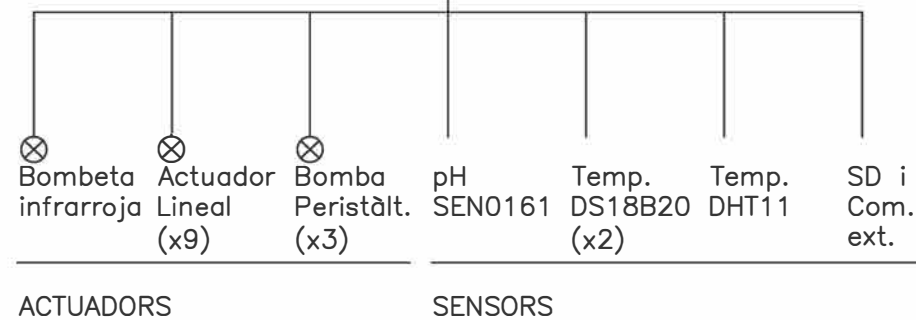
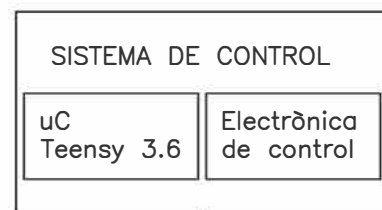
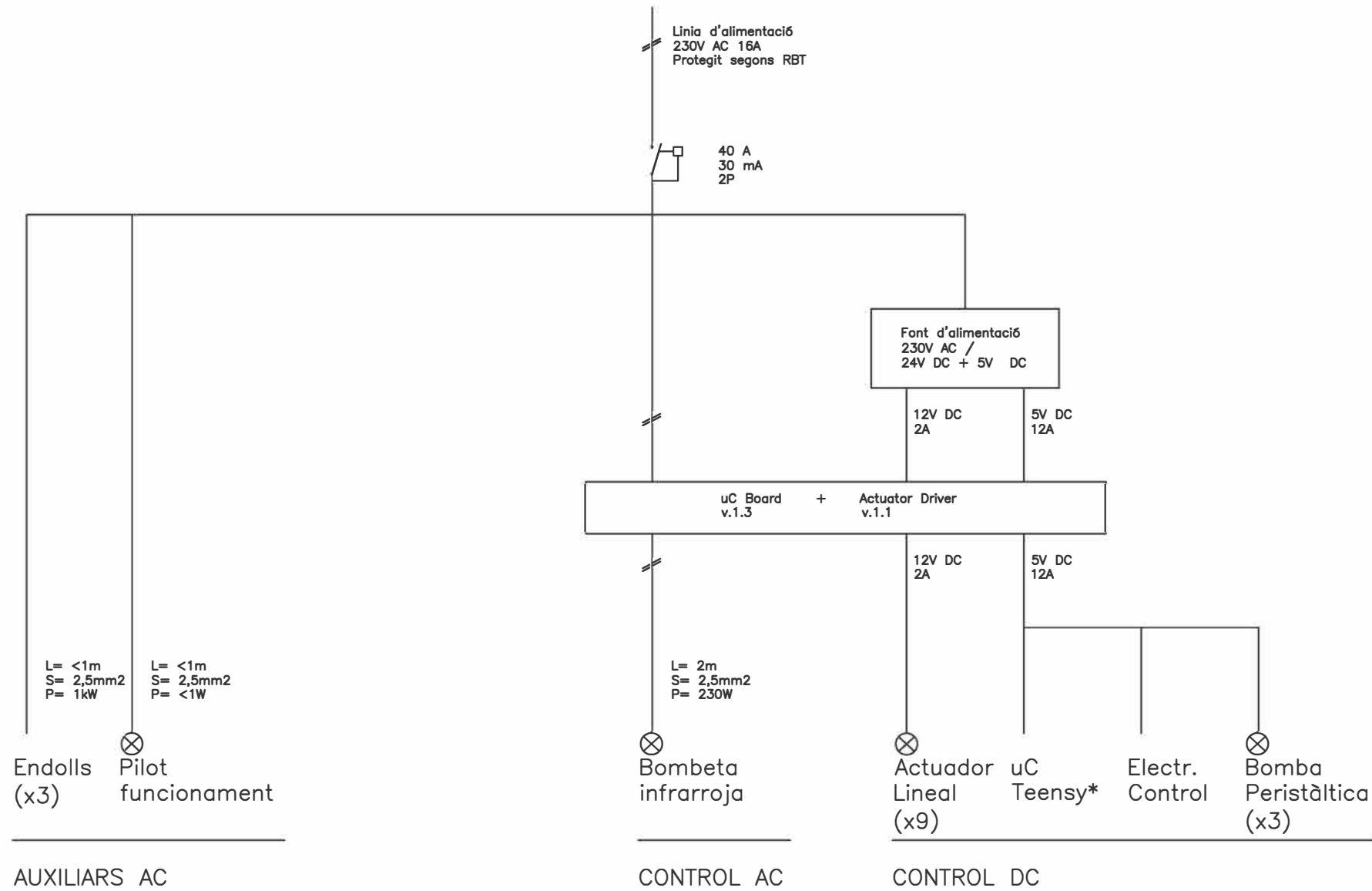





## ESQUEMA DEL QUADRE ELÈCTRIC

## C. ESQUEMA DEL QUADRE ELÈCTRIC

---



 <b>Universitat</b> de les Illes Balears	Autor: Miquel Font i Mas	Plànol: Esquema unifilar i detall de la configuració del sistema de control		
	Tutor: Dr. Miquel Jesús Roca Adrover	Treball de Final de Màster Màster en Enginyeria Industrial Universitat de les Illes Balears		
PROJECTE: SIMULADOR GÀSTRIC HUMÀ: Disseny d'un digestor centrat en la replicació del peristaltisme		Escala: n/d	Data: 10 de setembre del 2020	N°: C1





## **DOCUMENTACIÓ CONTABLE**





Actuonix Motion Devices Inc.  
580 Starling Lane  
Victoria, BC  
Canada, V9E2A9  
888-225-9198  
sales@actuonix.com

Date: 11/07/2017  
Order#: 28004

Order Comments:

Please, the bill must include your company data (name, address, etc.) and ours: Name: Universitat de les Illes Balears. Address: Cra. de Valldemossa, km 7.5. Palma (Illes Balears). E-07122. VAT: ESQ0718001A

Additional Information:

If shipping on your own account, please select your shipping company: UPS

Bill To: (Customer ID#10836)

University of the Balearic Islands  
Susana Simal  
Ctra Valldemossa, km 7.5  
Ed. mateu Orfila  
Palma de Mallorca, Illes Balears 07122  
Spain  
0034653793842  
susana.simal@uib.es

Ship To:

University of the Balearic Islands  
Susana Simal  
Ctra Valldemossa, km 7.5  
Ed. mateu Orfila  
Palma de Mallorca, Illes Balears 07122  
Spain  
0034653793842

Payment Method:

Credit Card: MasterCard  
Susana Simal Florindo  
\*\*\*\*\*7802

Shipping Method:

UPS Worldwide Expedited (3-5 Business Days)

Code	Description	Qty	Price	Total USD
L12-100-210-12-1	L12 -I Micro Linear Servo - 100mm - 210:1 - 12 vdc [Actuator Stroke:100mm] [Gear Ratio:210:1] [Max. Operating Voltage:12 volts]	1	\$90.00	\$90.00

Subtotal: \$90.00  
Tax: \$0.00  
Shipping: \$22.03  
Grand Total: \$112.03

Payable in USD





## Instrucciones de pago

Utilice las siguientes instrucciones para efectuar el pago su pedido de compra PROFORMA:

### Transferencia en Euro

Mouser Electronics, Inc.  
Cuenta bancaria: 40234501  
JPMorgan Chase Bank NA, London  
Código Swift: CHASGB2L  
Sort code/Código bancario: 60-92-42  
IBAN: GB64CHAS60924240234501

Tras efectuar el pago, mándenos un correo electrónico a [emea.remit@mouser.com](mailto:emea.remit@mouser.com) con la siguiente información:

- Número de referencia: 5495757
- Número de factura pro forma: 240725484
- Nombre del banco que procesará su transferencia:

Observación: Este pedido se cancelará si no se recibe el pago en menos de 15 días laborables a partir de la fecha del pedido.

D. DOCUMENTACIÓ CONTABLE



**MOUSER  
ELECTRONICS**

1000 North Main Street, Mansfield, TX 76063  
 Representante de Atención al Cliente: Ester Garcia  
 Atención al Cliente: +34 936455263  
 Crédito: +49 (0)89 520 462 115  
 VAT# FR 27512466913

Transferencia Bancaria a:  
 Mouser Electronics, Inc.  
 Cuenta bancaria: 40234501  
 JPMorgan Chase Bank NA, London  
 Código Swift: CHASGB2L  
 Sort code/Código bancario: 60-92-42  
 IBAN: GB64CHAS60924240234501  
 \* Número de referencia: 5495757  
 INCOTERMS: DDP

**Factura pro forma  
Pro Forma Invoice**

N.º de factura Invoice No.	Fecha de factura Invoice Date	N.º de página Page No.
240725484	07-NOV-17	1 of 2
N.º de la orden de com Purchase Order No.	N.º de seguimiento Master Tracker No.	
PROFORMA		
Número de cliente Customer Num	Términos Terms	Fecha del pedido Order Date
5495757	PAYMENT IN ADVANCE	07-NOV-17

Nombre del contacto Contact Name	Envío mediante Ship Via
MIQUEL FONT	FEDEX INT'L PRIORITY

Facturar a Bill To	UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS CRA. DE VALLDEMOSSA, KM 7.5. 07122 PALMA SPAIN
-----------------------	--

Enviar a Ship To	UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS CRA. DE VALLDEMOSSA, KM 7.5. 07122 PALMA SPAIN
---------------------	--

VAT# ES Q0718001A

N.º de línea Line No.	Referencia de Mouser N.º ref. de cliente/fabricante Descripción	Mouser Part Number Customer/MFG Part No. Description	Cantidad pedida Quantity Ordered	Cantidad enviada Quantity Shipped	Cantidad pendiente Quantity Pending	Precio unitario Unit Price (EUR)	Precio total Extended Price (EUR)
1	426-DFR0478 Ref. fabricante: DFR0478 DFRobot FireBeetle ESP32 / Equipos y placas de desarrollo - inalámbricos US HTS:8504902000 COO:CN		1			16.150	16.15
2	474-DEV-14057 Ref. fabricante: DEV-14057 SparkFun Teensy 3.6 / Equipos y placas de desarrollo - ARM TARIC:8542319000 COO:US		1			28.730	28.73
3	474-PRT-12002 Ref. fabricante: PRT-12002 SparkFun / Accesorios SparkFun TARIC:8536908599 COO:US		2			4.210	8.42
4	485-239 Ref. fabricante: 239 Adafruit Full Sized / Accesorios Adafruit TARIC:8537109999 COO:CN		2			5.060	10.12
5	709-RD50A Ref. fabricante: RD-50A Mean Well 54W 5V/6A 12V/2A / Fuentes de alimentación conmutadas TARIC:8504403090 COO:CN		1			18.960	18.96
6	485-772 Ref. fabricante: 772 Adafruit LCD Shield Kit 16x2 / Herramientas de desarrollo de pantalla TARIC:8542900000 COO:US		1			16.960	16.96
Mercancía Merchandise			Manejo Wire Transfer Fee	Transporte Freight	IVA VAT	Continua Continued	
Información del envío					Shipping Information		
* IMPORTANTE: Para poder procesar el pago correctamente, debe incluir el número de cliente y el número de factura al presentar el pago. Se encuentran en la parte superior de esta factura. Autoliquidación de IVA - intracomunitario - entrega. * IMPORTANT: In order to process your payment correctly you must include the reference number and the invoice number when you submit your payment. These are located at the top of this invoice. VAT reverse charge - intra community -delivery.							
Número de seguimiento y peso facturado					Tracking Number(s) and Billed Weights		

Representante fiscal en Francia: Fiscal Solutions S.A.R.L., 23 Rue du Clos d'Orléans, Fontenay-sous-Bois, 94 120, FR  
 Todos los pedidos están sujetos a todos los términos y condiciones mencionados en: <http://www.mouser.es/saleterms/>  
 This order is subject to all terms and conditions displayed at: <http://www.mouser.es/saleterms/>  
 Envíenos un correo electrónico a [emea.remit@mouser.com](mailto:emea.remit@mouser.com) con la información de la transferencia.  
 Please email us at [emea.remit@mouser.com](mailto:emea.remit@mouser.com) with wire transfer details.



**MOUSER  
ELECTRONICS**

1000 North Main Street, Mansfield, TX 76063  
Representante de Atención al Cliente: Ester Garcia  
Atención al Cliente: +34 936455263  
Crédito: +49 (0)89 520 462 115  
VAT# FR 27512466913

Transferencia Bancaria a:  
Mouser Electronics, Inc.  
Cuenta bancaria: 40234501  
JPMorgan Chase Bank NA, London  
Código Swift: CHASGB2L  
Sort code/Código bancario: 60-92-42  
IBAN: GB64CHAS60924240234501  
\* Número de referencia: 5495757  
INCOTERMS: DDP

**Factura pro forma  
Pro Forma Invoice**

N.º de factura Invoice No.	Fecha de factura Invoice Date	N.º de página Page No.
240725484	07-NOV-17	2 of 2
N.º de la orden de com Purchase Order No.	N.º de seguimiento Master Tracker No.	
PROFORMA		
Número de cliente Customer Num	Términos Terms	Fecha del pedido Order Date
5495757	PAYMENT IN ADVANCE	07-NOV-17

Nombre del contacto Contact Name	Envío mediante Ship Via	Número de cliente Customer Num	Términos Terms	Fecha del pedido Order Date
MIQUEL FONT	FEDEX INT'L PRIORITY	5495757	PAYMENT IN ADVANCE	07-NOV-17

Facturar a Bill To	UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS CRA. DE VALLDEMOSSA, KM 7.5. 07122 PALMA SPAIN	Enviar a Ship To	UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS CRA. DE VALLDEMOSSA, KM 7.5. 07122 PALMA SPAIN
-----------------------	--	---------------------	--

VAT# ES Q0718001A

N.º de línea Line No.	Referencia de Mouser N.º ref. de cliente/fabricante Descripción	Mouser Part Number Customer/MFG Part No. Description	Cantidad pedida Quantity Ordered	Cantidad enviada Quantity Shipped	Cantidad pendiente Quantity Pending	Precio unitario Unit Price (EUR)	Precio total Extended Price (EUR)
7	854-ST1 Ref. fabricante: ST1 BusBoard Prototype Systems StripBoard-1, 1 side / Placas de circuito impreso y maquetas TARIC:8536699099 COO:KR		1			3.180	3.18
8	854-PR2H1 Ref. fabricante: PR2H1 BusBoard Prototype Systems Pr Brd2H-1, 2H Strip / Placas de circuito impreso y maquetas TARIC:8536699099 COO:KR		2			3.190	6.38
9	858-P160KN-QQC15B20K Ref. fabricante: P160KN-QQC15B20K Welwyn Components / TT Electronics 16mm Rotary / Potenciómetros TARIC:8533409000 COO:CN		1			0.612	0.61
10	474-BOB-12009 Ref. fabricante: BOB-12009 SparkFun Logic Level Convert / Placas hijas y placas OEM TARIC:8542399000 COO:US		5			2.510	12.55
11	485-1447 Ref. fabricante: 1447 Adafruit / Herramientas de desarrollo de pantalla TARIC:8531204090 COO:CN		1			9.310	9.31
12	485-2047 Ref. fabricante: 2047 Adafruit / Accesorios Adafruit US HTS:3926902500 COO:CN		2			0.425	0.85

Mercancía Merchandise	Manejo Wire Transfer Fee	Transporte Freight	IVA VAT	Pague este importe Please pay this amount	EUR 132.22
132.22	0.00	0.00	0.00		

Información del envío	Shipping Information
-----------------------	----------------------

Número de seguimiento y peso facturado		Tracking Number(s) and Billed Weights	

Representante fiscal en Francia: Fiscal Solutions S.A.R.L., 23 Rue du Clos d'Orléans, Fontenay-sous-Bois, 94 120, FR  
Todos los pedidos están sujetos a todos los términos y condiciones mencionados en: <http://www.mouser.es/saleterms/>  
This order is subject to all terms and conditions displayed at: <http://www.mouser.es/saleterms/>  
Envíenos un correo electrónico a [emea.remit@mouser.com](mailto:emea.remit@mouser.com) con la información de la transferencia.  
Please email us at [emea.remit@mouser.com](mailto:emea.remit@mouser.com) with wire transfer details.





**Universitat**  
de les Illes Balears

IMPUTACIÓ PARTIDA FINALISTA A JUSTIFICAR

Exercici pressupostari 2017

Document núm. 2017 AD 2194 2017 COMANDA 58963

Data 08-11-2017

COMANDA

Subministrador: FR27512466913

PDME MOUSER ELECTRONICS INC  
23 RUE DU CLOS D'ORLEANS  
94120 FONTENAY SOUS BOIS  
FONTENAY SOUS BOIS  
França

Senyors,

**Descripció de la despesa:**

PLACAS DE CIRCUITO IMOESO Y MAQUETAS, POTENCIOMETROS, PLACAS HIJAS Y PLACAS OEM, HERRAMIENTAS DE DESARROLLO DE PANTALLA, ACCESORIOS ADAFRUIT, EQUIPOS Y PLACAS DE SERROLLO, ACCESORIOS SPARKFUN, FUENTES DE DESARROLLO CONMUTADAS, HER

**Import total:** 132,22

**Condicions**

No s'admetran variacions que no s'hagin comunicat abans del subministrament.

Material degudament empaquetat per a evitar-ne la deterioració.

**Lliurament**

**A l'atenció de:** UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS NIF: ESQ0718001A  
**Departament:** 0414 QUÍMICA  
**Centre:** 100201 ÀREA ADM. EDIFICIS MATEU ORFILA I GUILLEM COLOM

**Pagament** transferència

Atès que no disposam de les vostres dades bancàries, feu constar damunt la factura les dades necessàries, banc-oficina-dígit de control-núm. compte, per tramitar la transferència.

**Observacions**

L'albarà conformat pel receptor del material servirà per estendre la factura corresponent.

**Factura en paper**

- \* La factura ha d'anar amb la firma i segell de l'empresa a tots els exemplars
- \* S'ha de trametre en original i dues còpies a:

ÀREA ADMINISTRATIVA EDIFICIS MATEU ORFILA I  
GUILLEM COLOM  
Edificis Mateu Orfila i Guillem Colom - Campus Universitari  
Ctra. Valldemossa, Km. 7'5  
07122 Palma

**Signatures**

Per la UIB,

**Factura electrònica**

Les factures d'import igual o superior a 5.000 euros han de ser electròniques

Per a la factura electrònica el número de comanda

("número de pedido" a la plataforma) és:

La factura ha d'estar associada amb la relació FACE:

**D20172017058963K**

**OC-GE0003490,OG-GE0003490,UT-GE0003490**



**Central:** Gran Via Asima, 3 Tel: 971 430034 Fax: 971 759635 07009 Palma de Mallorca  
**Sucursales:** Via Palma, 5 Tel: 971 843131 Fax: 971 846075 07500 Manacor (Mallorca)  
Raspallar, 14 - Blancadona Tel: 971 310903 Fax: 971 310803 07800 Eivissa

Socias y Rosselló, S.L. Gremio Herreros 38, 07009 Palma de Mallorca - C.I.F. B-07036569 - RM Baleares - Tomo 212, Libro 149, Sección 3, Folio 62, Hoja 4216

Pág: 1

FORMA DE PAGO: CONTADO	UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS Q0718001A CTRA. VALLEDEMOSSA, KM. 7,5 07122 PALMA DE MALLORCA
------------------------	---

SU REFERENCIA	COD. CLIENTE	AGENTE	FACTURA DE	FECHA FACTURA	Nº FACTURA
	92-00000	00	CARGO	17/09/2018	20218090812

CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO	%	IMPORTE
----------	----------	--------	---	---------

CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO	%	IMPORTE
<b>*** INGENIRIA QUIMICA ***</b>				
MODULO CONEXION - REGLETA				
POUYET CORTE/PRBA.STG C2 10P IA340532265	1,00	5,5500	30,00	3,8850
SELECTOR - ACCESORIOS				
SCHNEID. CABEZA CONM. 2P.M. CORTA ZB4-BD2	1,00	13,0300	30,00	9,1210
PORTALAMPARAS				
E-27 PORCELANA	1,00	3,1600	30,00	2,2120
PULSADOR - ACCESORIOS				
SCHNEID. CUERPO COMPLETO NC ZB4-BZ102	1,00	9,9900	30,00	6,9930
TUBO AISLANTE				
TERM. 3M HSR3000 3'0/1'0X10M NEGRO	1,00	25,8300	25,00	19,3725
INT.DIFERENCIAL II				
40A 30mA SCHNEIDER ACTI9 AC A9R60240	1,00	24,9000	NETO	24,9000

**PAGADO**

El responsable de la entrega del residuo de envase o envase usado, para su correcta gestión ambiental será el poseedor final (R.D. 782/1998 Art. 18.1)

BASE IMPONIBLE	%IVA	CUOTA IVA	%R.E.	CUOTA R.E.	TOTAL FACTURA
66,48	21,00	13,96			80,44 €

La información que sus datos serán incorporados al sistema de tratamiento de datos de SOCIAS Y ROSSELLÓ S.L. con C.I.F. B07036569 y domicilio social en Gremio Herreros 38 07009 PALMA DE MALLORCA (ILLES BALEARS) con la finalidad de atender nuestras obligaciones. En cumplimiento con la normativa vigente, SOCIAS Y ROSSELLÓ S.L. informa que sus datos serán comunicados a través de los canales de comunicación que se establezcan con la finalidad de cumplir con la prestación de los servicios. El hecho de no facilitar sus datos a estas entidades implica que no se podrá cumplir con la prestación de los servicios. También se informará que puede contactar con el Delegado de Protección de Datos de SOCIAS Y ROSSELLÓ S.L. dirigiéndose por email a [datos@sociasyrossello.es](mailto:datos@sociasyrossello.es) o al teléfono 971711162. SOCIAS Y ROSSELLÓ S.L. informa que procederá a borrar los datos de manera no selectiva, transparente, adecuada, puntualmente, sin dilación y actualizada. Es por ello que SOCIAS Y ROSSELLÓ S.L. se compromete a adoptar todas las medidas razonables para que sólo se suministren y mantengan sus datos cuando sean necesarios. Podrá ejercer los derechos de acceso, rectificación, eliminación, oposición, portabilidad y cancelación/retirada en los términos que establece la normativa vigente en materia de protección de datos, dirigiendo su petición a la dirección postal Gremio Herreros 38 07009 PALMA DE MALLORCA y también a través de la mail [datos@sociasyrossello.es](mailto:datos@sociasyrossello.es). Para ejercer o la Autoridad de Control competente para presentar la reclamación que considere oportuna.





## Albarán

Página 1 de 1  
14/09/2018 - 12:45

**SUBMINISTRAMENTS MANACOR**  
**C/FERRERS, 4 POLIG.INDUSTRIAL**  
**07500 Manacor**  
Telf.: 971845766 Fax: 971847507  
NIF: B07902356  
E-mail: [compras@comercialmascaro.com](mailto:compras@comercialmascaro.com)

**Q0718001A** (001526/0006)  
**UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS**  
**DEPART. ING. QUIMICA**  
**CTRA. VALLEMOSSA KM. 7.5**  
**07122 PALMA DE MALLORCA**  
**BALEARES (ESPAÑA)**  
Telf.: 971173168

**Serie: S8 Número: 8505**  
**Ref.:**  
**Fecha: 14/09/2018 (€)**  
**Pres.:**

**Almacén: FERRERS, 4 (07500 Manacor)**  
**Operarios: 000022/000022**  
**Transporte:**  
**Kg.: Bultos: F**

Artículo	Descripción	Unidades	P.V.P.	% Dto	Importe
530216	CAJA EMPALME ESTANCA 140X190 GW44007	1	15,5124		15,51
25069	TAPON DE REGISTRO 125	1	11,0744	35,00	7,20
35BA913441	BASE 4 TOMAS C/INTR Y CABLE 3 X 1,5mm 1,5MT	1	3,6000	10,00	3,24
98014	ABRAZADERA ISOF. M8 41/4 125 SIN TIRAF.	1	2,5785	25,00	1,93

Base	% I.V.A.	I.V.A.	% Rec.	Recargo	Total
27,88	21	5,85	0	0,00	33,73 €
<b>Total:</b>					<b>33,73 €</b>

En virtud de la Ley Orgánica de Protección de Datos 15/1999, de 13 de Diciembre, se informa que sus datos formarán parte de un fichero registrado en la Agencia Española de Protección de Datos, propiedad de MASCARÓ, SUMINISTRES I SERVEIS S.L., población de MANACOR (Illes Balears). La finalidad del fichero es la gestión de clientes, proveedores, facturación y contabilidad. Usted tiene derecho de acceso, oposición, rectificación y cancelación que deberá ejercer mediante escrito a la dirección antes mencionada.

SA NOSTRA: (BMN) ES94 0487 2111 01 2000002633 GBMNESMMXXX

No se admiten devoluciones pasados 15 días.





implantació  
d'identitat  
corporativa i  
senyalització

## FACTURA

Número : 410/A18

14 de Septiembre de 2018

### UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS

CTRA.VALLDEMOSA KM.7,5

07122 PALMA DE MCA.

Q-0718001-A

971-172815 687926050

Nº de Página : 1

Código Cliente : 1423

Cantidad	Artículo	Precio	Importe
1,00	METACRILAT 2MM 80 X 80 (X2)	73,00	73,00

Forma de Pago	Total	
TRANSF.BANCARIA BANKIA ES04 2038 6579 81 6000448390		73,00
	<b>21 % I.V.A.</b>	15,33
	<b>Total Factura</b>	<b>88,33 €</b>

ROTULS MANACOR S.L.  
nif B-07450430 carrer de la pagesia, 67 07500 polígon industrial manacor.tel. 971 84 36 09 fax 971 84 53 37 gestio@rotuls.com www.rotuls.com



**Dielectro Balear**  
MATERIAL ELÉCTRICO Y FONTANERÍA

7535 ENV.PDR: IO MATEU ORFILA

PPTO: 72  
LISTA: 1781957  
ALB: 430682  
Pág: 1 de 1

A Sonepar Company 105783 CIF: Q0718001A

COD.ARTÍCULO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO	%DIO	IMPORTE
1798GW48011	CAJA GEWISS GW-48011 516X294 EMPOTRAR	1,00	39,000000	30,00	6,21
1281148286BAN	BRIDAPOLO N N BLANCO 4,8X286 DIN/REF BAN 100 UN	Ref.Prov: GW48011 100,00	0,103500	40,00	21,85
0188XB5AA31	""PULS. RASANTE ""NA"" VERDE""	Ref.Prov: 148286BAN 2,00	17,620000	38,00	2,81
0577003245220R	PILOTO D.8,6MM 220V.ROJO	Ref.Prov: XB5AA31 2,00	2,160000	35,00	5,95
0577003335220F	PILOTO D.13,5MM 220V.VERDE FLUOR	Ref.Prov: 003245220R 2,00	4,580000	35,00	7,22
010727831-35	CAJA SUPERFICIE 3 MOD. ANCH.S.27 BL-NIEVE 27831-35	Ref.Prov: 003335220F 1,00	12,040000	40,00	2,00
010727472-65	BASE 2P TT LAT.SCHUKO+SEG.S.27 BL-NIEVE 27472-65	Ref.Prov: 27831-35 3,00	4,660000	40,00	8,39
		Ref.Prov: 27472-65		Marca: SIMON	9

CENTRO DE MANACOR  
PAGESIA, 68 B

UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS

DIELECTRO BALEAR S.A.U. REGISTRO MERCANTIL DE BALEARES, TOMO 30.000, FOLIO 200, INSCRIPCIÓN 11.100.00000004

07500 - MANACOR, ISLAS BALEARES CTRA.DE VALLEDOSA, KM. 7'500 EDIF.SON LLEDO  
Tel.: 971555555 Fax: 97155536207122 - PALMA DE MALLORCA DIELECTROBALEAR@SONEPAR.ES ILLES  
BALEARIS www.dielectrobalear.com Tel.: 971173000-CENTRALITA Fax: 971173426

IMP.BRUTO: 79,73

	BASE IMPON.	%IVA	IMP.%IVA	%R.E.	IMP.%R.EQ.	<b>TOTAL FACTURA 96,47 EUR</b>
	79,73	21,00	16,74			

Representante: LIBRES Vendedor: ESTEVE MATAMALAS FEBRER  
F.Pago: 30100 RECIBO A LA VISTA  
Bultos: 1 Palets Preparador Revisor  
Observaciones:  
Observaciones LPR:

Recibi conforme:

Operación sujeta a las condiciones generales de venta disponibles en: www.dielectrobalear.com/condiciones-contratacion

\*A050201800004000430682\*



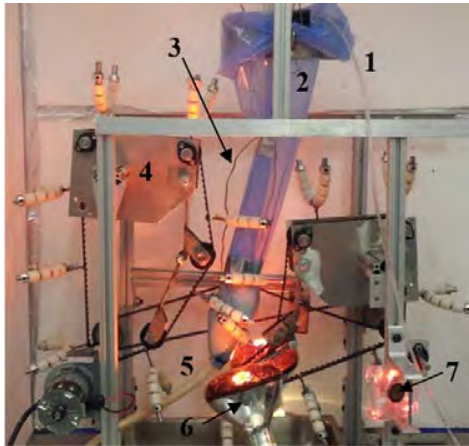


## **DOCUMENTACIÓ UC DAVIS**





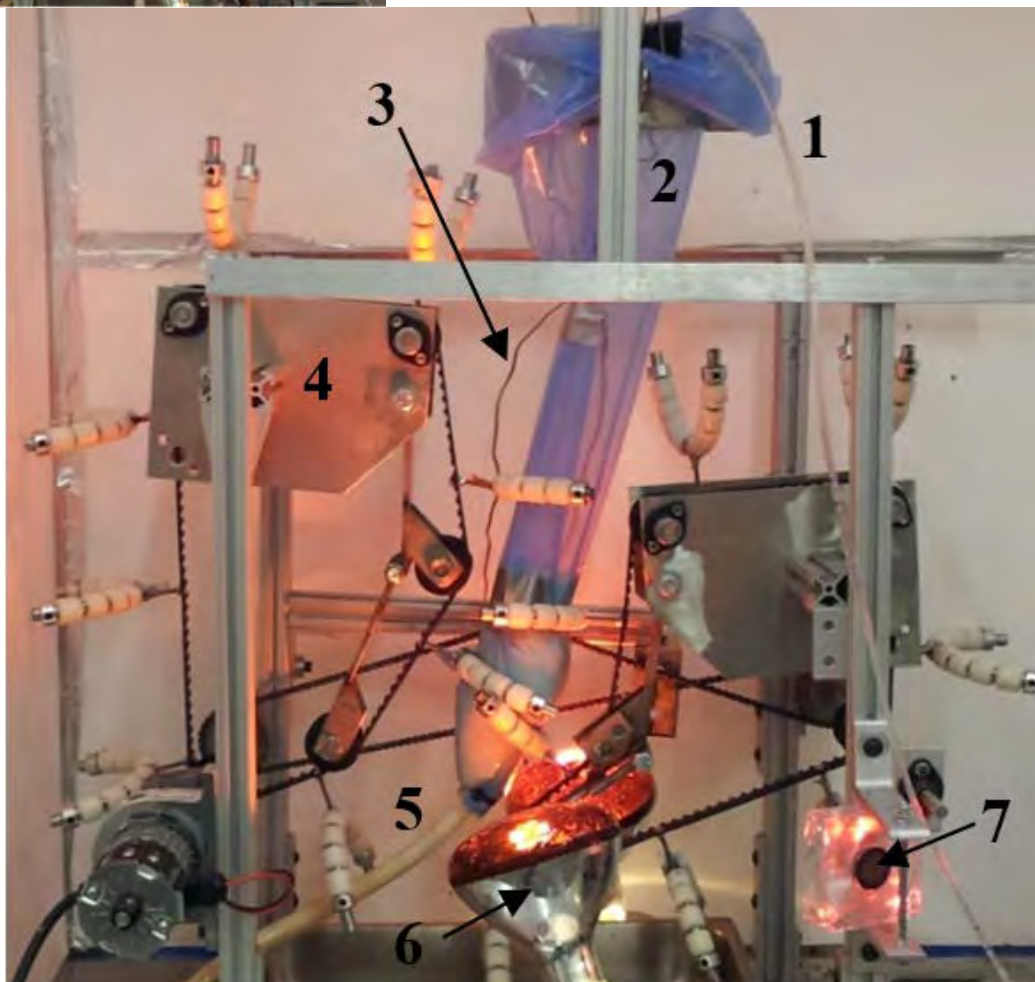
Two digestion methods were used: (1) shaking water bath with high agitation (300 rpm), and the HGS system, a dynamic mechanical model developed at UCD (Figure 5). For both methods, simulated gastric fluid was used (as described in Section 1.4.1).



**Figure 5. Human gastric simulator (HGS) system used to study food behavior during gastric digestion.**

Key system components are labelled as follows:

- (1) inlet tube for addition of gastric secretions
- (2) disposable liner, custom shaped to match stomach geometry
- (3) thermocouple for temperature control
- (4) belt-roller system to create peristaltic contractions on stomach cavity
- (5) outlet tube to control gastric emptying
- (6) heating lamp for temperature control
- (7) fan for air circulation and temperature regulation





## ÍNDIX DE FIGURES

2.1. Anatomia de l'estómac [7]. . . . .	6
2.2. Divisió funcional de l'estómac i punts rellevants [13]. . . . .	7
2.3. Evolució de la peristalsi (superior) segons la senyal de despolarització de les cèl·lules (inferior) [8]. . . . .	8
2.4. Mecanisme de propulsió-retropropulsió antropilòdic [8]. . . . .	9
2.5. Mesures de l'activitat elèctrica per zones gàstriques [8]. . . . .	10
2.6. Patró de contraccions amb absència d'ingesta segons la zona gàstrica [10].	11
2.7. Estructura de l'estómac segons activitat secretora [9]. . . . .	13
2.8. Detall de la regió glandular cardial [7]. . . . .	13
3.1. Esquema digestor estàtic monocompartamental Oomen [15]. . . . .	16
3.2. Esquema digestor dinàmic monocompartamental DGM [15]. . . . .	17
3.3. Esquema digestor dinàmic monocompartamental HGS [15]. . . . .	17
3.4. Human Gastric Simulator - UC Davis. . . . .	18
3.5. Esquema digestor dinàmic multicompartamental TIM [15]. . . . .	19
3.6. Esquema d'una base vibratòria o sistema <i>Packed-bed reactor</i> (PBR) [25]. 1) Bany aquós; 2) Base vibratòria; 3) Reservori del reactiu; 4) Bomba peristàltica; 5) Tub TYGON; 6) Columna de vidre plena de cubs de poliuretà; 7) Producte. . . . .	20
3.7. Barra agitadora d'acer inoxidable centrífuga de dues pales [26]. . . . .	21
3.8. Agitador amb doble sistema de pales [27]. . . . .	21
3.9. Digestor d'Oomen basat en mescla amb un <i>head over heels rotator</i> [28]. . .	22
3.10. Agitador magnètic de Hanna Instruments [29] . . . . .	23
3.11. Diagrama esquemàtic dels quatre dissenys estudiats per Wu [33]: a) difusors de fons; b) tub central d'aspiració; c) dues llances; d) dos tubs d'aspiració. Imatges provinents de la tesi del Dr. Sánchez [30] . . . . .	24
3.12. Vista frontal de la magnitud de la velocitat de la fase líquida dels quatre dissenys estudiats [30]. . . . .	25
3.13. a) Digrama esquemàtic describint la deformació sinusoidal a través de la paret estomacal; b) Geometria estomacal amb les ones de contracció antral [13]. . . . .	25
3.14. Perfils de velocitat a l'estómac a l'aproximar-se una ACW cap al pílor [13].	26
3.15. Vectors de velocitat (m/s) del fluxe en un estómac humà a T(N+1/3) s [13].	26
3.16. Esquema del DGM. Aquest prototip replica el volum intern estomacal d'un humà, operant en els rangs fisiològics [36]. . . . .	27
3.17. Exemple de mostres de 0.78 N i 0.65 N abans (a) i després de ser processades pel DGM (b) i l'aparell de dissolució USP II (c), respectivament [17]. . . . .	28

3.18. HGS v1. 1) Motor; 2) màniga de làtex; 3) bossa interna; 4) tubs de secreció; 5) corròns; 6) corretja; 7) bombeta per regular la temperatura; 8) aillant de poliestiré. . . . .	29
3.19. Vista superior del HGS v.1. 1) Màniga de làtex amb bossa interna; 2) tubs de secreció; 3) corró; 4) motor; 5) ventilador; 6) eix de transmissió; 7) engranatge; 8) bombeta. . . . .	30
3.20. Detall del sistema de politges. 1) Cambra de làtex; 2) corretja; 3) corró; 4) politja; 5) engranatge; 6) Unió Love-Joy; 7) transmissió. . . . .	31
3.21. Model tridimensional del HGS cedit per la UC Davis. . . . .	32
3.22. Vista frontal del HGS v.2. Imatge cedida per la UC Davis. . . . .	33
3.23. Detall de la cavitat gàstrica del HGS v.2 en ple peristaltisme. Imatge cedida per la UC Davis. . . . .	33
3.24. Disseny conceptual d'un <i>soft</i> -estómac robot [22]. . . . .	34
3.25. El model robòtic d'estómac es compon de tres capes musculars, cada una formada per un únic actuator com el de la figura 3.26 [22]. . . . .	34
3.26. Disseny de l'actuator del grup muscular [22]. . . . .	35
3.27. Procés de deformació del model de tres capes [22]. . . . .	35
4.1. Resum estructura del sistema proposat. . . . .	38
4.2. Contenidor gàstric: a) Màniga de làtex original, b) Màniga modificada, c) Zones de sellat marcat amb línies discontinues. . . . .	40
4.3. Vista del model CAD de la pinça. . . . .	41
4.4. Esquema configuració dels tres anells musculars i els tres punts d'aplicació en cada anell. Imatge modificada a partir de la figura original 3.25 . . . . .	42
5.1. Imatges del procés de muntatge del bastidor. . . . .	46
5.2. Vista frontal de simulador gàstric totalment muntat i preparat per a ser utilitzat. . . . .	47
5.3. Detall del sistema de subjecció de la cavitat gàstrica. . . . .	48
5.4. Resultat final del muntatge del contenidor gàstric. . . . .	49
5.5. Detall del quadre elèctric de protecció i control dissenyat. . . . .	50
5.6. Lateral esquerra de l'envolvent amb els botons de funció. . . . .	50
5.7. Esquemes de resistències de <i>pull-up</i> . . . . .	51
5.8. Sonda de temperatura DS18B20. . . . .	52
5.9. Evolució de l'error de lectura de la temperatura segons la temperatura real. Gràfic propi a partir de les dades del fabricant [52]. . . . .	52
5.10. Evolució de l'error entre 0 i 70°C. Dades del fabricant [52]. . . . .	53
5.11. Situació de la bombeta en referència a la resta d'equips. . . . .	54
5.12. Detall del mecanisme d'anclatge de la bombeta i el connector ceràmic. . . . .	54
5.13. Dispositiu de mostreig de pH amb sortida per gravitació. . . . .	55
5.14. Detall de bombes peristàltiques i el cablejat comú a través de CAT5. . . . .	56
5.15. Situació de les tres bombes peristàltiques: bomba de mostreig líquid, bomba de recollida continua per mesura de pH, bomba de secreció de HCl, d'esquerra a dreta. . . . .	57
5.16. Actuadors amb sistema d'unió. . . . .	57
5.17. Corbes de potència segons velocitat. Font: fabricant [57]. . . . .	58
5.18. Vista A del Model CAD de la pinça. . . . .	59
5.19. Vista B del Model CAD de la pinça. . . . .	59

5.20. Vista posterior-lateral de la pinça fabricada. . . . .	60
5.21. Vista anterior-lateral de la pinça fabricada. . . . .	61
5.22. Anvers i revers del controlador Teensy 3.6 [69] . . . . .	64
5.23. Anvers de la uC Board v.1.3. . . . .	65
5.24. Revers de la uC Board v.1.3. . . . .	66
5.25. Anvers de l'Actuator Driver v.1.1. . . . .	67
5.26. Revers de l'Actuator Driver v.1.1. . . . .	67
5.27. Esquema de la configuració del sistema de control (més detall a l'annex C). . . . .	68
6.1. Esquema general de funcionament per etapes. . . . .	70
6.2. Evolució temporal de la temperatura de l'aliment esperada teòricament. . . . .	71
6.3. Esquema complet del funcionament del sistema. . . . .	74



## BIBLIOGRAFIA

- [1] O. O. M. de la Salud, “Oms | ¿qué es la malnutrición?” *WHO*, 2017. [Online]. Available: <http://www.who.int/features/qa/malnutrition/es/> 1
- [2] P. N. Vozmediano, U. Tutor, and J. V. G. Pérez, “Particle size analysis of sweet potato crackers during in vitro digestion.” 1
- [3] M. Hu, Y. Li, E. A. Decker, and D. J. McClements, “Role of calcium and calcium-binding agents on the lipase digestibility of emulsified lipids using an in vitro digestion model,” *Food Hydrocolloids*, vol. 24, no. 8, pp. 719–725, 2010. 1.1
- [4] Y. Li, M. Hu, and D. J. McClements, “Factors affecting lipase digestibility of emulsified lipids using an in vitro digestion model: Proposal for a standardised ph-stat method,” *Food Chemistry*, vol. 126, no. 2, pp. 498–505, 2011. 1.1
- [5] J. Calvo Lerma, “Digestión in vitro de grasas en pacientes sometidos a terapia de sustitución enzimática: puesta a punto del método y ensayos de digestión de leche,” 2015. 1.1
- [6] L. M. Sullivan, J. J. Kehoe, L. Barry, M. J. Buckley, F. Shanahan, K. Mok, and A. Brodkorb, “Gastric digestion of  $\alpha$ -lactalbumin in adult human subjects using capsule endoscopy and nasogastric tube sampling,” *British journal of nutrition*, vol. 112, no. 4, pp. 638–646, 2014. 1.1
- [7] F. Tresguerres and J. Angel, “Fisiología humana,” 2003. 1, 2.1, 2.8, E
- [8] R. Greger and U. Windhorst, “Comprehensive human physiology,” *From Cellular Mechanisms to Integration*, p. 1996, 1996. 1, 2.3, 2.4, 2.5, E
- [9] A. C. Guyton, *Tratado de fisiología médica*. Elsevier Brasil, 2006. 1, 2.7, E
- [10] R. BERNE and M. LEVY, “Fisiología: Elsevier-mosby,” 2009. 1, 2.6, 2.1.3, E
- [11] R. Lopez, “Guía docent fisiología medica i,” 2020. [Online]. Available: [https://guies.uab.cat/guies\\_docents/public/portal/html/2020/assignatura/102957/ca](https://guies.uab.cat/guies_docents/public/portal/html/2020/assignatura/102957/ca) 1
- [12] M. Solanas, “Fisiología medica i,” 2017. 1
- [13] S. Singh and R. P. Singh, “Gastric digestion of foods: Mathematical modeling of flow field in a human stomach,” in *Food engineering interfaces*. Springer, 2010, pp. 99–117. 2.2, 3.4.2, 3.4.2, 3.13, 3.14, 3.15, 3.4.5, E



- [14] A. Oomen, C. Rompelberg, E. Van de Kamp, D. Pereboom, L. De Zwart, and A. Sips, "Effect of bile type on the bioaccessibility of soil contaminants in an in vitro digestion model," *Archives of environmental contamination and toxicology*, vol. 46, no. 2, pp. 183–188, 2004. [3.1](#), [3.4.1](#)
- [15] A. Guerra, L. Etienne-Mesmin, V. Livrelli, S. Denis, S. Blanquet-Diot, and M. Alric, "Relevance and challenges in modeling human gastric and small intestinal digestion," *Trends in biotechnology*, vol. 30, no. 11, pp. 591–600, 2012. [3.1](#), [3.2](#), [3.3](#), [3.5](#), [E](#)
- [16] A. Brodkorb, L. Egger, M. Alminger, P. Alvito, R. Assunção, S. Ballance, T. Bohn, C. Bourlieu-Lacanal, R. Boutrou, F. Carrière *et al.*, "Infogest static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion," *Nature protocols*, vol. 14, no. 4, pp. 991–1014, 2019. [3.1](#), [3.1](#), [4.5](#)
- [17] M. Vardakou, A. Mercuri, S. A. Barker, D. Q. Craig, R. M. Faulks, and M. S. Wickham, "Achieving antral grinding forces in biorelevant in vitro models: comparing the usp dissolution apparatus ii and the dynamic gastric model with human in vivo data," *Aaps Pharmscitech*, vol. 12, no. 2, pp. 620–626, 2011. [3.2](#), [3.4.3](#), [3.4.3](#), [3.17](#), [E](#)
- [18] F. Kong and R. P. Singh, "A human gastric simulator (hgs) to study food digestion in human stomach," *Journal of food science*, vol. 75, no. 9, pp. E627–E635, 2010. [3.2](#), [3.4.4](#), [4.2.3](#)
- [19] C. S. Levi and U. Lesmes, "Bi-compartmental elderly or adult dynamic digestion models applied to interrogate protein digestibility," *Food & function*, vol. 5, no. 10, pp. 2402–2409, 2014. [3.3](#)
- [20] M. Minekus, P. Marteau, R. Havenaar, and J. H. H. i. Veld, "A multicompartamental dynamic computer-controlled model simulating the stomach and small intestine," *Alternatives to laboratory animals*, vol. 23, no. 2, pp. 197–209, 1995. [3.3](#)
- [21] M. Verwei, M. Minekus, E. Zeijdner, R. Schilderink, and R. Havenaar, "Evaluation of two dynamic in vitro models simulating fasted and fed state conditions in the upper gastrointestinal tract (tim-1 and tiny-tim) for investigating the bioaccessibility of pharmaceutical compounds from oral dosage forms," *International journal of pharmaceuticals*, vol. 498, no. 1-2, pp. 178–186, 2016. [3.3](#)
- [22] Y. Dang, L. K. Cheng, M. Stommel, and W. Xu, "Technical requirements and conceptualization of a soft pneumatic actuator inspired by human gastric motility," in *2016 23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*. IEEE, 2016, pp. 1–6. [3.3](#), [3.4.5](#), [3.4.5](#), [3.24](#), [3.25](#), [3.26](#), [3.27](#), [4.2.1](#), [4.4](#), [E](#)
- [23] C. Narayanan, "Production of phosphate-rich biofertiliser using vermicompost and anaerobic digester sludge—a case study," 2012. [3.4.1](#)
- [24] V. Virtanen, S. Jääskeläinen, and P. Seiskari, "Reactor and method for solid state fermentation," Oct. 4 2011, uS Patent 8,030,054. [3.4.1](#)

- [25] S. Hama, H. Yamaji, T. Fukumizu, T. Numata, S. Tamalampudi, A. Kondo, H. Noda, and H. Fukuda, “Biodiesel-fuel production in a packed-bed reactor using lipase-producing rhizopus oryzae cells immobilized within biomass support particles,” *Biochemical Engineering Journal*, vol. 34, no. 3, pp. 273–278, 2007. 3.6, E
- [26] Labprocess, “Varilla agitadora de acero inoxidable centrífuga de 2 palas,” Oct. 4 2015. [Online]. Available: <https://www.labprocess.es/varilla-agitadora-tipo-1> 3.4.1, 3.7, E
- [27] J. Fierro Fernández *et al.*, “Co-digestión de purines, residuos urbanos y de la industria del biodiésel= co-digestion of swine manure, urban wastes and residues from biodiesel production,” 2014. 3.4.1, 3.8, E
- [28] E. COMMISSION, “Determination of release of phthalate plasticizers in saliva simulant,” *Appendix 1 of report V3932*, 2001. 3.9, E
- [29] H. Instruments, “Agitador magnético,” Oct. 4 2016. [Online]. Available: <https://hannainst.cr/> 3.10, E
- [30] “Optimización de la agitación de un digestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional,” 2016. 3.4.1, 3.11, 3.12, E
- [31] K. Karim, R. Varma, M. Vesvikar, and M. Al-Dahhan, “Flow pattern visualization of a simulated digester,” *Water Research*, vol. 38, no. 17, pp. 3659–3670, 2004. 3.4.1
- [32] B. Wu, “Cfd simulation of gas and non-newtonian fluid two-phase flow in anaerobic digesters,” *Water Research*, vol. 44, no. 13, pp. 3861–3874, 2010. 3.4.1
- [33] ———, “Cfd simulation of gas mixing in anaerobic digesters,” *Computers and electronics in agriculture*, vol. 109, pp. 278–286, 2014. 3.11, E
- [34] M. J. Ferrua, F. Kong, and R. P. Singh, “Computational modeling of gastric digestion and the role of food material properties,” *Trends in Food Science & Technology*, vol. 22, no. 9, pp. 480–491, 2011. 3.4.2
- [35] M. Ferrua and R. Singh, “Modeling the fluid dynamics in a human stomach to gain insight of food digestion,” *Journal of food science*, vol. 75, no. 7, pp. R151–R162, 2010. 3.4.2
- [36] M. Wickham, R. Faulks, J. Mann, and G. Mandalari, “The design, operation, and application of a dynamic gastric model,” *Dissolution Technol*, vol. 19, no. 3, pp. 15–22, 2012. 3.4.3, 3.16, 4.2.2, 4.5, E
- [37] S. Caiola, “Check out uc davis human gastric simulator, which examines the mysteries of digestion,” *The Sacramento Bee*, 2018. [Online]. Available: <https://www.sacbee.com/news/local/health-and-medicine/article125906614.html/> 3.4.4
- [38] W. Clark, “The robotic stomach. uc davis professor dives into the depths of human digestion,” *Comstocks Magazine*, 2017. [Online]. Available: <https://www.comstocksmag.com/web-only/robotic-stomach> 3.4.4

- [39] H. Kozu, Y. Nakata, M. Nakajima, M. A. Neves, K. Uemura, S. Sato, I. Kobayashi, and S. Ichikawa, "Development of a human gastric digestion simulator equipped with peristalsis function for the direct observation and analysis of the food digestion process," *Food Science and Technology Research*, vol. 20, no. 2, pp. 225–233, 2014. [3.4.4](#)
- [40] J. Wang, P. Wu, M. Liu, Z. Liao, Y. Wang, Z. Dong, and X. D. Chen, "An advanced near real dynamic in vitro human stomach system to study gastric digestion and emptying of beef stew and cooked rice," *Food & function*, vol. 10, no. 5, pp. 2914–2925, 2019. [3.4.4](#)
- [41] C. Li, W. Yu, P. Wu, and X. D. Chen, "Current in vitro digestion systems for understanding food digestion in human upper gastrointestinal tract," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 96, pp. 114–126, 2020. [3.4.4](#)
- [42] Y. Dang, H. Devaraj, M. Stommel, L. K. Cheng, A. J. McDaid, and W. Xu, "Experimental investigation into the dynamics of a radially contracting actuator with embedded sensing capability," *Soft robotics*, vol. 7, no. 4, pp. 478–490, 2020. [3.4.5](#)
- [43] R. Hashem, W. Xu, M. Stommel, and L. K. Cheng, "Fea evaluation of ring-shaped soft-actuators for a stomach robot," in *International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications*. Springer, 2017, pp. 475–487. [3.4.5](#)
- [44] Y. Dang, Y. Liu, R. Hashem, D. Bhattacharya, J. Allen, M. Stommel, L. K. Cheng, and W. Xu, "Sogut: A soft robotic gastric simulator," *Soft Robotics*, 2020. [3.4.5](#)
- [45] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, "A review of shape memory alloy research, applications and opportunities," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 1078–1113, 2014. [3.4.5](#)
- [46] M. P. Wolf, G. B. Salieb-Beugelaar, and P. Hunziker, "Pdms with designer functionalities—properties, modifications strategies, and applications," *Progress in Polymer Science*, vol. 83, pp. 97–134, 2018. [3.4.5](#)
- [47] F. Kong and R. Singh, "Disintegration of solid foods in human stomach," *Journal of food science*, vol. 73, no. 5, pp. R67–R80, 2008. [3.4.5](#)
- [48] F. Kong and R. P. Singh, "A model stomach system to investigate disintegration kinetics of solid foods during gastric digestion," *Journal of food science*, vol. 73, no. 5, pp. E202–E210, 2008. [4.2.1](#)
- [49] Minitube, "Tecnologia reproductiva animal: Equino," *Catalogo*, p. 7, 2015. [Online]. Available: <http://ranchproducts.com.ec/wp-content/uploads/pdfs/minitube/equino2015.pdf> [4.3](#)
- [50] D. E. Beasley, A. M. Koltz, J. E. Lambert, N. Fierer, and R. R. Dunn, "The evolution of stomach acidity and its relevance to the human microbiome," *PloS one*, vol. 10, no. 7, p. e0134116, 2015. [4.5](#)

- [51] R. E. de Baja Tensión and I. T. Complementarias, “Ministerio de ciencia y tecnología,” *Ceysa. Barcelona*, 2002. [Online]. Available: [https://www.boe.es/biblioteca\\_juridica/codigos/abrir\\_pdf.php?fich=326\\_Reglamento\\_electrotecnico\\_para\\_baja\\_tension\\_e\\_ITC.pdf](https://www.boe.es/biblioteca_juridica/codigos/abrir_pdf.php?fich=326_Reglamento_electrotecnico_para_baja_tension_e_ITC.pdf) 5.1.3, 5.3.4
- [52] M. Integrated, “Ds18b20 programmable resolution 1-wire digital thermometer,” 2015. [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> 5.2.1, 5.9, 5.10, E
- [53] P. Stoffregen, “Onewire library - github repository,” 2019. [Online]. Available: <https://github.com/PaulStoffregen/OneWire> 5.2.1
- [54] D. Robotics, “Dht11 humidity & temperature sensor,” *DHT11 Datasheet*, 2010. [Online]. Available: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/785590/D-Robotics/DHT11/1> 5.2.1
- [55] D. Robot, “Sensor ph (sku: Sen0161),” 2019. [Online]. Available: [https://media.digikey.com/pdf/DataSheets/DFRobotPDFs/SEN0161\\_SEN0169\\_Web.pdf](https://media.digikey.com/pdf/DataSheets/DFRobotPDFs/SEN0161_SEN0169_Web.pdf) 5.2.2
- [56] Coldfire, “12v peristaltic pump,” *PP-12-5000 Datasheet*, 2011. [Online]. Available: <https://coldfire-electronica.com/esp/item/234/bomba-peristaltica-de-agua-12v-5000rpm> 5.2.2
- [57] Actuonix-Firgelli, “Linear actuator l12-100-210-12-i,” *L12-100-210-12-I Datasheet*, 2011. [Online]. Available: <https://s3.amazonaws.com/actuonix/Actuonix+L12+Datasheet.pdf> 5.2.3, 5.17, E
- [58] Solidworks, “Solidworks education,” 2018. [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-education> 5.2.3
- [59] Alpha-Electronic, “Membrane force sensor,” *MF01 Datasheet*, 2013. [Online]. Available: [https://www.mouser.es/datasheet/2/13/Alpha\\_06032019\\_Part\\_104-MFS-C01\\_\(MF01-N-221-A01-1600678\).pdf](https://www.mouser.es/datasheet/2/13/Alpha_06032019_Part_104-MFS-C01_(MF01-N-221-A01-1600678).pdf) 5.2.3
- [60] Formlabs, “Form 2: Sla 3d printer,” *Formlabs Catalogue*, 2015. [Online]. Available: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/> 5.2.3
- [61] Schneider-Electric, “Plcs i otros controladores,” *Schneider Electric Catalogue*, 2020. [Online]. Available: <https://www.se.com/es/es/product-category/3900-pac-plc-y-otros-controladores> 5.3.1
- [62] O. Pi, “Orange pi: new generation mini-pc,” 2020. [Online]. Available: <http://www.orangepi.org/> 5.3.1
- [63] Intel, “Placas para intel nuc,” 2020. [Online]. Available: <https://www.intel.es/content/www/es/es/products/boards-kits/nuc/boards.html> 5.3.1
- [64] MagPi, “The official raspberry pi projects book,” *Russell Barnes, Ed.*, 2015. [Online]. Available: [https://www.raspberrypi.org/magpi-issues/Projects\\_Book\\_v1.pdf](https://www.raspberrypi.org/magpi-issues/Projects_Book_v1.pdf) 3.2.1 5.3.1

- [65] J. Geerling, "Power consumption | raspberry pi dramble," 2015. [Online]. Available: [www.pidramble.com/wiki/benchmarks/power-consumption](http://www.pidramble.com/wiki/benchmarks/power-consumption) 5.3.1
- [66] R. L. Cayssials, *Sistemas embebidos en FPGA*. Alfaomega, 2014. 5.3.1
- [67] M. Banzi and M. Shiloh, *Getting started with Arduino: the open source electronics prototyping platform*. Maker Media, Inc., 2014. 5.3.1
- [68] "Arduino platform webpage," 2020. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/> 5.3.1
- [69] PJRC, "Teensy 3.6: Usb development board," 2017. [Online]. Available: <https://www.pjrc.com/store/teensy36.html> 5.3.1, 5.22a, 5.22b, 5.22, E
- [70] Wikipedia, "Cable de categoría 5," 2020. [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Cable\\_de\\_Categoria\\_5](https://es.wikipedia.org/wiki/Cable_de_Categoria_5) 5.3.4
- [71] I. y. c. Ministerio de Econoia, "Convocatoria de subvenciones a proyectos de investigación fundamental orientada y acciones complementaria tipo d." 2017. [Online]. Available: [http://wwwsp.inia.es/Comunicacion/NoticiasHome/Lists/Noticias%20Home/Attachments/654/PROPUESTA%20RESOLUCI%C3%93N%20PROVISIONAL%20RTA2015\\_con%20anexo.pdf](http://wwwsp.inia.es/Comunicacion/NoticiasHome/Lists/Noticias%20Home/Attachments/654/PROPUESTA%20RESOLUCI%C3%93N%20PROVISIONAL%20RTA2015_con%20anexo.pdf) 8

